

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUANA ENGELER FELIPPI

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE TRÊS BLOCOS  
DA BARRAGEM DE ITAIPU POR MEIO DO IMCRB

FOZ DO IGUAÇU

2018

LUANA ENGELER FELIPPI

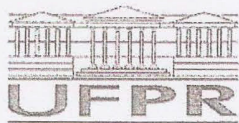
ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE TRÊS BLOCOS  
DA BARRAGEM DE ITAIPU POR MEIO DO IMCRB

Monografia apresentada como requisito parcial à  
obtenção do título de Especialista, do Programa de  
Pós Graduação em Métodos Numéricos em  
Engenharia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Sheila Regina Oro

Coorientador: Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto

FOZ DO IGUAÇU  
2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR CIÊNCIAS EXATAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS EM  
ENGENHARIA - 40001016284E1

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Monografia de Especialização de LUANA ENGELER FELIPPI intitulada: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE TRÊS BLOCOS DA BARRAGEM DE ITAIPU POR MEIO DO IMCRB, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de especialista está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


CURITIBA, 10 de Dezembro de 2018.

  
SHEILA REGINA ORO

Presidente da Banca Examinadora (UTFPR)

  
DIMILSON PINTO COELHO

Avaliador Externo (FPTI)

  
ORLANDO CATARINO DA SILVA

Avaliador Externo (UNIOESTE)

À minha família e ao meu namorado pelo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e da saúde, permitindo a realização deste trabalho.

À toda minha família pelo apoio e compreensão na ausência em inúmeros finais de semana de aula, em particular à minha mãe e avó pelas orações e preocupações, ao meu pai, por todas as vezes que pacientemente me levou e buscou na rodoviária, dedicando seu próprio sono para me permitir estudar, e ao meu namorado por não medir esforços quando precisei, pelo incentivo e por ser meu porto seguro.

Agradeço imensamente à minha orientadora Profa. Dra. Sheila Regina Oro, por me aceitar como orientanda, pela sugestão do tema, por sua doutrina, organização, colaboração, por estar sempre à disposição para dúvidas e questionamentos, e pelo acompanhamento total em todas as etapas da pesquisa.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto, pelas suas aulas ricas em conhecimentos, pelas correções, incentivos e lições de vida.

Aos professores da UFPR e UNIOESTE, pelos conhecimentos adquiridos durante as aulas.

Ao PTI – CEASB pela oportunidade de cursar a especialização e pela concessão de uma bolsa de pesquisa realizada paralelamente a este trabalho, e ainda pelo fornecimento dos dados e informações para a realização da mesma.

Aos meus colegas de sala, em particular à Lucía e Victor, pelo companheirismo, e ao Newton e Sônia pelas caronas e por me acolherem em sua casa por diversas vezes.

*A persistência é o caminho do êxito.*

*Charles Chaplin*

## RESUMO

A preocupação com a segurança de uma barragem é de extrema importância quando se analisa os impactos sociais, ambientais e financeiros causados por uma ruptura. O monitoramento constante de sua estrutura colabora para a identificação de anomalias e no diagnóstico de sua vitalidade. Este trabalho apresenta uma análise estatística do comportamento estrutural de três blocos da Barragem de Itaipu, sendo estes F19/20, do Trecho F, e I10 e I23, do Trecho I. Para isso utilizaram-se medições manuais dos sensores dos instrumentos: pêndulo direto e invertido, bases de alongâmetro, extensômetros múltiplos de hastes, e piezômetros, instalados na estrutura ou fundação de cada bloco. Fez-se o uso de técnicas de análise multivariada como a análise fatorial, cartas de controle, e o Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem – IMCRB. Por meio da análise fatorial foi possível identificar os sensores da instrumentação que apresentaram maior variância, e portanto tiveram maior relevância no que diz respeito à movimentação da barragem. O índice IMCRB representou de forma conjunta os fatores, identificados na análise fatorial, apresentando o comportamento estrutural global de cada bloco estudado. As cartas de controle permitiram identificar valores fora dos limites de confiança estipulados, comportamento sistemático e tendências, permitindo avaliar as condições de cada bloco. Portanto, os resultados obtidos agregaram conhecimento e auxiliaram no monitoramento estrutural dos três blocos da Barragem, colaborando para a avaliação da sua segurança.

Palavras-chave: Barragens de concreto. Monitoramento de estruturas. Instrumentação. Análise fatorial. IMCRB.

## **ABSTRACT**

The Concern about the safety of a dam is extremely important when analyzing the social, environmental and financial impacts caused by a rupture. The constant monitoring of its structure contributes to the identification of anomalies and the diagnosis of its vitality. This work presents a statistical analysis of the structural behavior of three blocks of the Itaipu Dam, being these F19 / 20, of Excerpt F, and I10 and I23, of Excerpt I. For this work, it was used manual measurements of the instruments sensors: direct and inverted pendulum, bases of length, multiple extensometers of rods, and piezometers, installed in the structure or foundation of each block. Multivariate analysis techniques such as factorial analysis, control charts, and the Joint Monitoring Index of Dam Blocks responses - IMCRB were used. By means of the factorial analysis it was possible to identify the instrumentation sensors that presented greater variance, and therefore had greater relevance with respect to the movement of the dam. The IMCRB index jointly represented the factors identified in the factorial analysis, presenting the overall structural behavior of each block studied. The control charts allowed the work to identify values outside the stipulated confidence limits, systematic behaviors and trends, letting it evaluate the conditions of each block. Therefore, the results obtained added knowledge and helped in the structural monitoring of the three blocks of the Dam, collaborating to evaluate their safety.

Key-words: Concrete dams. Structural monitoring. Instrumentation. Factor analysis. IMCRB.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Barragem de Itaipu.....   | 17 |
| Figura 2: Bloco de gravidade aliviada .....   | 18 |
| Figura 3: Bloco de contrafortes .....   | 19 |
| Figura 4: Exemplos de cartas de controle .....  | 25 |
| Figura 5: Fluxograma do método (parte 1).....   | 31 |
| Figura 6: Fluxograma do método (parte 2).....   | 32 |
| Figura 7: Bloco I10 do Trecho I da Barragem de Itaipu.....                              | 33 |
| Figura 8: Bloco I23 do Trecho I da Barragem de Itaipu.....                              | 34 |
| Figura 9: Bloco F19/20 do Trecho F da Barragem de Itaipu .....                          | 35 |
| Figura 10: Série temporal do primeiro fator .....                                       | 43 |
| Figura 11: Série temporal do segundo fator .....  | 43 |
| Figura 12: Série temporal do terceiro fator .....                                       | 44 |
| Figura 13: Série temporal do quarto fator.....  | 44 |
| Figura 14: Série temporal do quinto fator .....   | 44 |
| Figura 15: Série temporal do sexto fator .....  | 45 |
| Figura 16: Série para o IMCRB dos blocos F19/20 .....                                   | 46 |
| Figura 17: Carta de controle para o IMCRB dos blocos F19/20 .....                       | 47 |
| Figura 18: Gráfico CUSUM para o Bloco F19/20 .....                                      | 47 |
| Figura 19: Série diferenciada para o IMCRB dos blocos F19/20.....                       | 48 |
| Figura 20: Carta de controle para a série diferenciada do IMCRB dos blocos F19/20 ..... | 49 |
| Figura 21: Previsão para o IMCRB diferenciado dos blocos F19/20 .....                   | 49 |
| Figura 22: Série temporal do primeiro fator .....                                       | 51 |
| Figura 23: Série temporal do segundo fator .....  | 52 |
| Figura 24: Série temporal do terceiro fator .....                                       | 52 |
| Figura 25: Série temporal do quarto fator.....  | 53 |
| Figura 26: Série temporal do quinto fator .....   | 53 |
| Figura 27: Série para o IMCRB do bloco I10.....   | 54 |
| Figura 28: Carta de controle para o IMCRB do bloco I10.....                             | 55 |
| Figura 29: Gráfico CUSUM para o IMCRB do bloco I10 .....                                | 55 |
| Figura 30: Previsão para o IMCRB do bloco I10 .....                                     | 56 |
| Figura 31: Série temporal do primeiro fator .....                                       | 58 |
| Figura 32: Série temporal do segundo fator .....  | 58 |
| Figura 33: Série temporal do terceiro fator .....                                       | 59 |
| Figura 34: Série temporal do quarto fator.....  | 59 |
| Figura 35: Série temporal do quinto fator .....   | 59 |
| Figura 36: Série para o IMCRB do bloco I23.....   | 61 |
| Figura 37: Carta de controle para o IMCRB do bloco I23.....                             | 61 |
| Figura 38: Gráfico CUSUM para o IMCRB do bloco I23 .....                                | 62 |
| Figura 39: Série diferenciada para o IMCRB do bloco I23 .....                           | 63 |
| Figura 40: Carta de controle para a série diferenciada do IMCRB do bloco I23 .....      | 63 |
| Figura 41: Previsão para a série diferenciada do IMCRB do bloco I23 .....               | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Medidas descritivas Bloco F19/20 ..... | 41 |
| Tabela 2: Medidas descritivas bloco I10 .....    | 50 |
| Tabela 3: Medidas descritivas bloco I23 .....    | 56 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>13</b> |
| 1.1      | CONTEXTO E PROBLEMA .....   | 13        |
| 1.2      | OBJETIVOS .....   | 14        |
| 1.2.1    | Objetivo Geral.....   | 14        |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos .....   | 14        |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA .....   | 14        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>16</b> |
| 2.1      | BARRAGENS DE CONCRETO .....   | 16        |
| 2.2      | BARRAGEM DE ITAIPU .....  | 17        |
| 2.3      | SEGURANÇA DE BARRAGENS E MONITORAMENTO.....                                 | 19        |
| 2.3.1    | Instrumentação .....  | 20        |
| 2.4      | MÉTODOS ESTATÍSTICOS .....  | 21        |
| 2.4.1    | Análise Fatorial .....  | 21        |
| 2.4.2    | Cartas de Controle.....   | 24        |
| 2.4.3    | Séries Temporais.....   | 27        |
| 2.4.4    | Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem ..... | 28        |
| 2.5      | RECURSOS COMPUTACIONAIS .....   | 29        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>30</b> |
| 3.1      | TIPO DE PESQUISA.....   | 30        |
| 3.2      | COLETA DE DADOS .....   | 33        |
| 3.3      | ORGANIZAÇÃO DOS DADOS .....   | 35        |
| 3.4      | ANÁLISE FATORIAL.....   | 37        |
| 3.5      | SÉRIES PARA O IMCRB .....   | 38        |
| 3.6      | CARTAS DE CONTROLE .....  | 39        |
| 3.7      | INSERÇÃO DOS DADOS NOVOS .....  | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.8      | FLUOXOGRAMA DO MÉTODO .....                           | 30        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                   | <b>41</b> |
| 4.1      | BLOCOS F19/20 DO TRECHO F DA BARRAGEM DE ITAIPU ..... | 41        |
| 4.2      | BLOCO I10 DO TECHO I DA BARRAGEM DE ITAIPU .....      | 50        |
| 4.3      | BLOCO I23 DO TRECHO I DA BARRAGEM DE ITAIPU .....     | 56        |
|          | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                | <b>65</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                              | <b>65</b> |

## **LISTA DE SIGLAS**

CEASB – Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragem

IMCRB – Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem

PTI – Parque Tecnológico Itaipu

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

Existe sempre na segurança de barragens o intuito de diminuir as ameaças de acidentes e busca-se sempre alternativas que possam colaborar na análise da instrumentação, buscando sua segurança, evitando assim impactos causados por uma eventual ruptura.

De acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens, Lei 12.334, Capítulo II e Art. 3º (2010), é necessário que a segurança de uma barragem seja monitorada desde a fase de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional.

O monitoramento de barragens possibilita detectar mais rapidamente a incidência de anomalias e colabora para a agilidade na tomada de decisão e de medidas corretivas para o problema identificado. Esse monitoramento é realizado por meio da auscultação, que é um conjunto de procedimentos para avaliar a segurança estrutural da barragem ao longo de sua vida útil, a qual pode acontecer através de inspeções visuais e com auxílio da instrumentação.

De acordo com Machado (2007, p. 33), as “inspeções visuais periódicas de campo têm por objetivo detectar deteriorações em potencial e alertar sobre condições que possam comprometer a segurança das estruturas associadas das barragens”.

Por meio dos instrumentos instalados na barragem, realizam-se medições periódicas<sup>1</sup> em cada sensor, gerando uma imensa quantidade de dados. Para a análise das condições de segurança da barragem, são analisados diversos gráficos das séries dos dados coletados e então esses valores são comparados com os estabelecidos em projeto.

Diante disso, observa-se a importância de utilizar técnicas estatísticas que permitam identificar mais facilmente os sensores que possuem maior influência no

---

<sup>1</sup> O período entre as medições será aquele que a equipe responsável julgar necessário, de acordo com a necessidade de monitoramento, mais ou menos frequente, de certo instrumento. Por exemplo: mensal e quinzenal, para instrumentos manuais, e diários, para instrumentos automatizados.

comportamento da barragem, e fazer uso de um método que analise de forma conjunta os dados e facilite a interpretação do comportamento global das estruturas e fundações dos blocos da barragem.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar técnicas estatísticas e o Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem - IMCRB para analisar o comportamento estrutural dos Blocos F19/20, do Trecho F e Blocos I10 e I23, do Trecho I, da Barragem de Itaipu.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar por meio da análise fatorial, os sensores da instrumentação com maior relevância em relação a variabilidade dos dados;
- Utilizar o índice IMCRB para gerar séries que representem o comportamento conjunto da instrumentação de cada bloco estudado;
- Fazer uso de cartas de controle para verificar a disposição dos dados em relação com os limites estipulados;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

No âmbito da segurança de barragens existe uma preocupação muito grande na avaliação detalhada do comportamento das estruturas que compõem as obras, independente do material utilizado para a sua construção.

Barragens são obras que apresentam um potencial de risco bastante elevado, caso não sejam bem construídas e monitoradas, devido à possibilidade de ruptura, gerando consequências desastrosas para suas estruturas, para o meio ambiente, economia e principalmente pela possível perda de vidas humanas (ZUFFO, 2005).

O monitoramento dessas estruturas visa diminuir a probabilidade de um acidente, os quais resultam em sérias consequências, tais como, custo elevado e

danos significativos ao seu entorno. O monitoramento antecipa as informações de riscos da barragem e colabora para a tomada de medidas preventivas.

Os planos de auscultação de barragens são colocados em prática assim que a construção se inicia e seguem em exercício por toda a sua vida útil da barragem. Durante o início do projeto o plano visa diagnosticar a segurança da estrutura e seu funcionamento e, por outro lado, as estruturas envelhecem e se tornam vulneráveis a inúmeros fenômenos que influenciam o aumento do risco, logo é necessário fazer o acompanhamento constante da sua saúde estrutural.

De acordo com Zuffo (2005, p. 11), “o propósito de segurança de barragens é reconhecer os perigos potenciais oferecidos pelas estruturas e reduzi-los a níveis aceitáveis”. Ela comenta ainda que é possível construir barragens seguras e com o monitoramento corrigir a tempo possíveis deficiências que possam aparecer, antes que ocasionem perdas socioeconômicas, desastres ecológicos ou mortes.

Barragens existentes devem ser reavaliadas periodicamente a fim de se assegurar que elas estejam em condições seguras, de acordo com os padrões de segurança vigentes na data de avaliação. Com os conhecimentos hidrológicos, geológicos e de sismologia atuais, as barragens que outrora foram consideradas seguras, podem não mais se enquadrar nesta classificação (ZUFFO, 2005, p. 7).

A instrumentação possibilita acompanhar o comportamento de uma barragem em toda sua estrutura e fundação, podendo emitir alertas quando em condições anormais (MACHADO, 2007, p. 15).

Por meio da instrumentação obtêm-se uma quantidade bastante expressiva de dados, relacionados às frequências de medições dos sensores dos instrumentos, tornando trabalhosa qualquer interpretação acerca disso.

O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem – IMCRB foi desenvolvido por Oro (2016) utilizando técnicas estatísticas e representa de forma conjunta os dados das medições dos sensores de cada bloco de concreto da Barragem.

Em Oro (2016), o IMCRB foi utilizado para analisar o comportamento dos Blocos D7 e D8, do Trecho D, da Barragem de Itaipu, retornando resultados que coincidem com a realidade observada, mostrando-se adequados. Já o propósito deste trabalho foi aplicar o IMCRB como parâmetro para analisar o comportamento de outros blocos da Barragem de Itaipu.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BARRAGENS DE CONCRETO

Barragem é definida como uma estrutura construída de modo transversal ao curso de um rio ou talvegue e tem a função de elevar o nível da água e/ou criar um reservatório de acumulação de água para regular vazões de um rio ou outro fluído (MSIB, 2002, p.15).

Esse tipo de construção forma um obstáculo artificial, com capacidade de reter água ou outro líquido, rejeitos e detritos, com finalidade de armazenamento ou controle de algo, podendo ser pequenas e construídas de terra, frequentemente utilizadas em fazendas, até enormes estruturas de concreto, geralmente utilizadas para fornecimento de água, energia elétrica, controle de cheias, entre outras finalidades (SETTI et al., 2000).

Podem ser encontradas barragens de diferentes tipos, variando de acordo com sua finalidade, seu projeto de construção e os materiais utilizados. Chamam-se de barragens não convencionais aquelas construídas de madeira, alvenaria de pedra ou gabião. As barragens ditas convencionais são de concreto, podendo ser do tipo gravidade, gravidade aliviada, contraforte ou arco, de aterro, podendo ser do tipo terra, enrocamento ou rejeitos, e mistas, sendo de concreto e aterro (ORO, 2016).

As barragens são usadas pelo homem há mais de 5.000 anos, onde ruínas de barragens puderam ser encontradas em locais considerados berços da civilização (JANSEN, 1983, apud ZUFFO, 2005, p. 1).

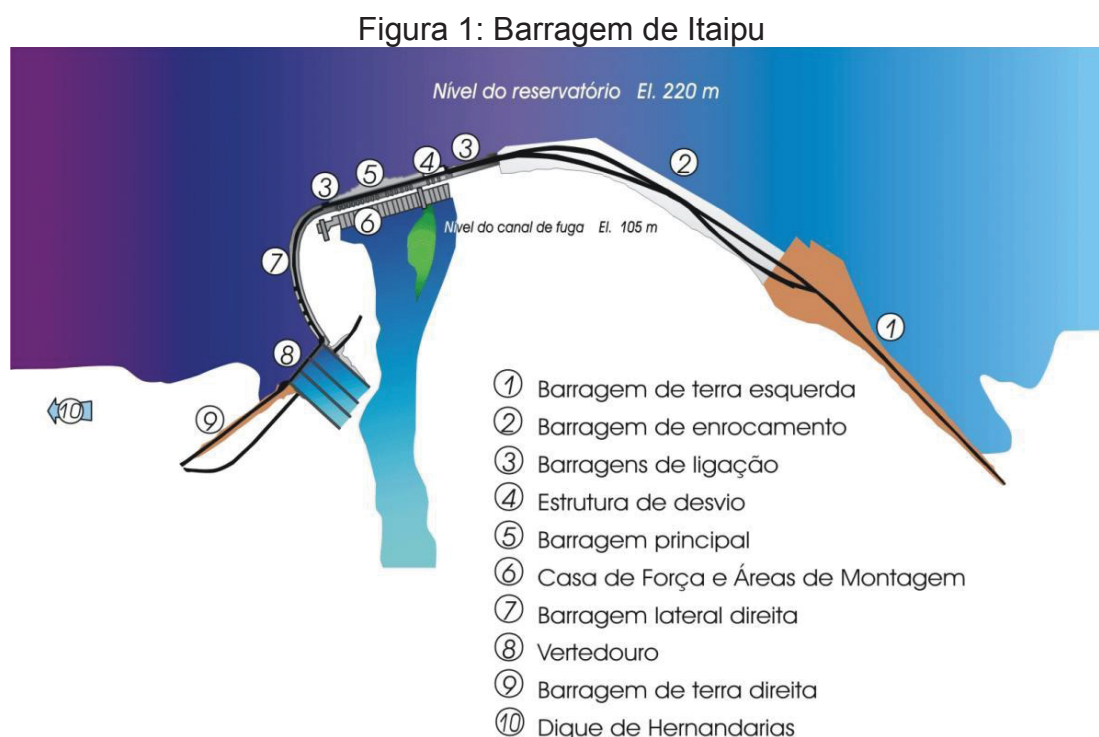
Inicialmente as barragens eram usadas em todo o mundo como represas de água para uso doméstico, irrigação e abastecimento. Com a revolução industrial, aumentaram as necessidades, e a utilidade das barragens foi ampliada como recurso no combate a enchentes, geração de energia elétrica, entre outros. “Elas ajudam a nação a se tornar auto-suficiente na produção de alimento e a prover energia necessária à industrialização” (ZUFFO, 2005, p. 9).

Barragens de concreto são construídas com materiais naturais, como a areia, ou produzidos artificialmente, como a pedra brita, adicionando-se aglomerados e aglomerantes como cimento, pozolanas, entre outros, e aditivos químicos. Esse tipo de barragem é classificado de acordo com sua forma ou geometria em: barragens de

gravidade, barragens de contraforte, barragens em arco ou arco-gravidade, e barragens de gravidade aliviada (POSSAN, 2013, p. 11).

## 2.2 BARRAGEM DE ITAIPU

A Barragem de Itaipu está situada no rio Paraná, fronteira do Brasil e Paraguai, próxima à cidade de Foz do Iguaçu. Sua extensão é de 7.919 m e sua altura máxima alcança 196m. Sua principal finalidade é geração de energia limpa e renovável (ITAIPU BINACIONAL, 2018). Essas dimensões fazem com que ela seja referência nos estudos de concreto e de segurança de barragens (SILVEIRA, 2003).



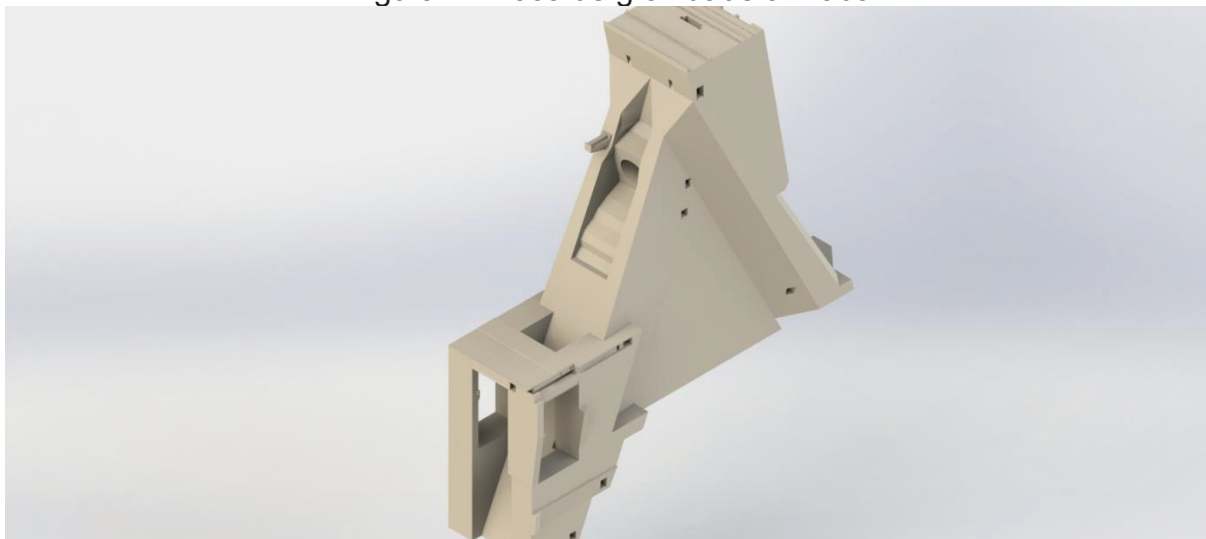
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2018)

A barragem de Itaipu foi construída com estrutura mista, com concreto, enrocamento e terra (Fig. 1).

Pelo fato de que para este trabalho são usados como referências os blocos F19/20 do Trecho F, I10 e I23, do Trecho I, localizados na barragem principal e de ligação, respectivamente, o tipo de estrutura estudada e aqui descrita está relacionado com esses dois trechos.

O Trecho F está localizado na barragem principal, a qual é integrada por blocos de gravidade-aliviada (Fig. 2), estendendo-se por 600 metros através do leito do Rio Paraná (SILVEIRA, 2003, p. 163).

Figura 2: Bloco de gravidade aliviada



FONTE: CEASB (2018)

Uma barragem de gravidade é uma estrutura maciça de concreto, constituída de vários blocos de concreto separados por juntas de contração para diminuir os efeitos provocados pelas tensões de origem térmica. O equilíbrio estático é realizado pelo próprio peso da estrutura, o qual é projetado para resistir aos esforços decorrentes de pressões hidrostáticas da montante (POSSAN, 2013, p. 12).

Barragens de gravidade aliviada são simplificações de barragens de gravidade. Porém, estas admitem espaços vazios em seu núcleo, com objetivo de reduzir o volume de concreto utilizado (POSSAN, 2013, p. 14).

Os blocos de gravidade aliviada da barragem principal de Itaipu receberam uma instrumentação bastante detalhada, devido a um sistema de chavetas inserido na fundação dos blocos centrais da barragem no período de construção (SILVEIRA, 2003, p. 163).

O Trecho I está localizado na barragem de ligação esquerda de Itaipu, a qual é constituída por blocos de concreto, do tipo contrafortes (Fig. 3).

Figura 3: Bloco de contrafortes



FONTE: CEASB (2018)

Contrafortes são estruturas como “pilares”, sua parede vedante é formada por lajes de concreto armado, apoiado nos contrafortes, por abóbodas cilíndricas. Essas estruturas recebem o esforço do empuxo do paramento de montante e o descarrega para as fundações (SCHREIBER, 1977).

Em barragens do tipo contrafortes são implantadas placas de concreto inclinadas, as quais constituem o paramento de montante, e transmitem pressão hidrostática a uma série de contrafortes perpendiculares ao eixo da barragem. Em geral, o volume de concreto utilizado em barragens de contraforte é bastante inferior em relação à barragem de gravidade (POSSAN, 2013).

### 2.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS E MONITORAMENTO

A segurança estrutural das barragens requer uma atenção especial. O termo segurança refere-se à capacidade que as barragens devem possuir para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes no que se referem aos aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais (MSB, 2002, p. 17).

De acordo com Silveira (2003), “controla-se o comportamento estrutural das obras por meio de inspeções visuais e de instrumentação.”

A inspeção regular da segurança de uma barragem deve ser realizada por uma equipe de profissionais capacitados, cujas atribuições estejam de acordo com o projeto, construção, operação ou manutenção das barragens (PIASENTIN, 2013, p. 39).

Piasentin (2013, p. 46) cita alguns fatores que precisam ser incorporados para as análises de segurança de barragens.

- A falha humana,
- A falta de capacitação do pessoal envolvido com obras da complexidade e risco, inerentes às barragens e,
- A precariedade dos dados e/ou disponibilidade de dados sem análise e interpretação por parte de profissional qualificado. Refiro-me aos dados que alimentam os modelos hidráulico-hidrológicos e aqueles obtidos através do sistema de auscultação instalado na estrutura,
- A sofisticação dos sistemas de auscultação com controle em estações remotas e o “descuido” com o método observacional (inspeções visuais),
- A sofisticação dos sistemas informatizados e/ou especialistas (expert systems) que devem ser tratados com cautela uma vez que, demandam confiabilidade nos dados de entrada. Os sistemas especialistas, que demandam o tratamento do conhecimento ou “judgement” e lidam com cenários que interagem com o usuário, etc. (PIASENTIN, 2013, p. 39).

A avaliação constante da saúde estrutural de barragens pode colaborar para a determinação de anomalias com rapidez, e consequentemente tomar decisões acerca disso (ZUCULIN, 2013, p. 9).

### 2.3.1 Instrumentação

Na estrutura da barragem de Itaipu estão inseridos sensores dos instrumentos de monitoramento da sua segurança. Existem mais de 2.792 instrumentos instalados no concreto e fundações, sendo que dentre estes apenas 270 possuem leituras automatizadas (ITAIPU BINACIONAL, 2018).

Devido ao porte estrutural de concreto, com blocos de até 196 m de altura, e algumas descontinuidades geológicas encontradas na fundação, a barragem de Itaipu recebeu um imenso sistema de chavetas de concreto na fundação dos blocos mais altos, e mereceu cuidado redobrado no monitoramento, sendo que sua instrumentação foi instalada desde o início da concretagem (SILVEIRA, 2003).

Os extensômetros múltiplos de haste foram instalados desde a fase inicial da construção para possibilitar a medição de recalques. Esses instrumentos geralmente

possuem duas ou três hastes, sendo que a mais profunda fica próxima à camada geológica com maior deformabilidade.

Para acompanhar os deslocamentos horizontais e verticais, ao longo da direção montante-jusante e relacionados a pontos profundos da fundação, foram instalados em poços de prospecção na fundação os pêndulos invertidos.

Os pêndulos diretos medem deslocamentos horizontais em determinadas cotas em relação à fundação da estrutura.

Para medir os deslocamentos diferenciais entre os blocos da barragem são utilizadas bases de alongâmetro. A instalação destes instrumentos pode ser realizada próxima à fundação em planos vertical ou horizontal, para colaborar no acompanhamento dos movimentos de abertura/fechamento, recalque diferencial, deslizamento horizontal entre blocos, deslocamentos diferenciais entre blocos e controle das injeções dessas juntas com calda de cimento.

Para o acompanhamento das subpressões se instalou ao longo do contato entre concreto e rocha, na montante, e nas discontinuidades da fundação, piezômetros tipo *standpipe*. Instalados inclinados para a montante, os piezômetros tem o objetivo de auscultar a região tracionada junto ao pé da montante da barragem (SILVEIRA, 2003).

## 2.4 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

### 2.4.1 Análise Fatorial

Quando um conjunto de medidas envolve apenas uma variável, diz-se que estes dados são univariados. Mas, quando se tem em um conjunto de medidas estejam envolvidas, ou seja, duas ou mais variáveis diz-se que os dados são multivariados. Especificamente, no caso de duas variáveis os dados são ditos bivariados.

Cada sensor da instrumentação instalada na barragem é considerado como uma variável, sendo que cada um deles fornece uma grandeza de engenharia que permite aos engenheiros analisar o comportamento da barragem. Estes dados podem ser representados através de uma série temporal para comparar os valores medidos com os dados de duas medições históricas. Desta forma, para que seja possível

analisar um conjunto de dados composto pelas medições de vários sensores, faz-se necessário utilizar um método de análise de dados multivariados.

De acordo com Lattin, Carol e Green (2011), a Análise Fatorial é um método multivariado que “diz respeito à identificação de fontes subjacentes de variação comuns a duas ou mais variáveis latentes (*chamadas fatores comuns*).”

O objetivo da Análise Fatorial é “descrever, se possível, a estrutura de covariância dos relacionamentos entre muitas variáveis em termos de poucas variáveis fundamentais, mas não observáveis (latentes), aleatórias chamadas fatores” (CHAVES NETO, 2014).

Para que seja possível aplicar a Análise Fatorial em um determinado conjunto de dados, é necessário aferir a adequabilidade do modelo fatorial. Isso pode ser realizado quando é verificado existência de Gaussianidade nos dados.

Para ajustar um modelo fatorial tem-se como conjectura que as variáveis do conjunto de dados analisados sejam correlacionadas entre si. Desta forma, para dados com distribuição normal p-variada pode-se fazer um teste de hipótese, chamado Teste de Esfericidade de Bartlett, o qual testa a hipótese nula  $H_0$  de que a matriz de correlação populacional  $\rho$  (estimada pela matriz de correlação amostral  $R$ ) é a matriz identidade  $I_{(p \times p)}$ , contra outra hipótese da matriz ser diferente da identidade (CHAVES NETO, 2014).

A estatística do teste é apresentada em Chaves Neto (2014) na Equação 1.

$$T = - \left[ n - \frac{1}{6}(2p + 11) \right] \sum_{i=1}^p \ln \hat{\lambda}_i \quad (1)$$

Onde:

$n$  é o tamanho da amostra;

$p$  é o número de variáveis utilizadas na matriz de correlação amostral  $R$

$\hat{\lambda}_i$  é o i-ésimo autovalor de  $R$

Para avaliar a qualidade do ajuste do modelo fatorial a um determinado conjunto de dados pode-se utilizar o Critério de Kaiser Meyer Olkin – KMO, o qual indica por meio de um coeficiente, variando de 0 a 1, a adequação da análise fatorial para a amostra de dados considerada.

O cálculo do coeficiente KMO é apresentado em Chaves Neto (2014) na Equação 2.

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} q_{ij}^2} \quad (2)$$

onde:

$r_{ij}^2$  é o quadrado do elemento pertencente a i-ésimo linha e j-ésima coluna da matriz de correlação amostral  $R_{(p \times p)}$ , sendo que  $i, j = 1, 2, \dots, p$ .

$q_{ij}^2$  é o quadrado do elemento pertencente a i-ésima linha e j-ésima coluna da matriz  $Q = DR^{-1}D$ , onde  $D = \left[ \sqrt{\text{diag}(R_{p \times p}^{-1})} \right]^{-1}$ , sendo que  $R_{p \times p}$  é a matriz de correlação amostral e  $i, j = 1, 2, \dots, p$ .

Mingoti (2007) apresenta o grau de adequação da amostra de acordo com o valor do coeficiente KMO:

- Valor igual ou acima de 0,9 apresenta adequação ótima;
- Valor igual ou entre 0,8 e 0,9 apresenta adequação boa;
- Valor igual ou entre 0,7 e 0,8 apresenta adequação razoável;
- Valor igual ou entre 0,6 e 0,7 apresenta adequação baixa;
- Valor igual ou abaixo de 0,6 é inadequada.

Para melhorar a capacidade de interpretação da solução fatorial pode ser realizada uma rotação apropriada para quantificar uma estrutura simples. O método de rotação varimax faz com que a estrutura seja apresentada de forma que cada variável se manifeste de forma significativa apenas em um fator, colaborando para a interpretação dos fatores (LATTIN; CAROL; GREEN, 2011).

O método de extração de fatores com maior utilização é por componentes principais. Alguns critérios são conhecidos na literatura, como o critério de Kaiser, Scree de Cattell e Análise paralela de Horn (LATTIN; CAROL; GREEN, 2011)..

No critério de Kaiser o número de fatores a ser utilizado é igual à quantidade de autovalores maiores que 1,0, referente a situação em que a análise fatorial é feita sobre a matriz de correlação padronizada. Esse critério corresponde a exclusão de fatores com autovalores inferiores a um (HAIR JR, 2005).



O critério de Cattell apresenta a diferença de explicação entre os primeiros fatores de uma análise fatorial seja grande e vai diminuindo essa explicação nos próximos fatores. É utilizado a construção do gráfico, conhecido como Scree de Cattell, o qual relaciona o número de fatores em sua ordem de extração e a curva resultante é usada na avaliação do ponto de corte (HAIR JR, 2005).

A análise paralela de Horn (APH) consiste na geração de matrizes randômicas de correlação e conseguinte análise fatorial destas matrizes e cálculo das médias dos autovalores obtidos. Para então se determinar o número de fatores, deve-se contar quantas vezes os autovalores da matriz de correlação amostral são maiores que os valores das médias dos autovalores da matriz de correlação randômica.

O interesse principal da análise fatorial pode estar nos parâmetros que podem ser determinados. Latin, Carol e Green (2011) citam que “a análise fatorial não é um fim em si, mas um passo intermediário no caminho para a análise posterior de dados”.

Os escores fatoriais de acordo com Chaves Neto (2014) “são estimativas de valores não observáveis dos vetores de fatores aleatórios”, e podem ser utilizados como dados de entrada para geração de índices. O cálculo dos escores fatoriais é realizado como apresentado na Equação 3.

$$\underline{\hat{f}}_i = (\widehat{L_z L_z})^{-1} \widehat{L_z} \underline{z}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Onde:

$\underline{\hat{f}}_i$  é a estimativa do escore fatorial correspondente à observação

$\widehat{L_z}$  é a matriz de cargas fatoriais

$\underline{z}_i$  é o vetor de observações padronizadas

#### 2.4.2 Cartas de Controle

Uma carta de controle, ou gráfico de controle, oferece visualização das ocorrências do processo ao longo do tempo, evidenciando por meio de intervalos de confiança estipulados para a variável, quaisquer anormalidades que possam vir se manifestar durante o período analisado.

A carta de controle colabora na identificação de fatores particulares de variação, detectados por pontos fora dos limites de controle ou também pela presença de um comportamento sistemático não aleatório (CHAVES NETO; CHAVES, 2014).

Chaves Neto e Chaves (2014) discorrem que as cartas de controle variam conforme os dados que contém, sejam contínuos ou discretos. Se os dados são contínuos e originários de várias amostras coletadas, ela poderá ser construída com média amostral  $\bar{x}$  e amplitude  $R$ , ou desvio padrão  $s$ .

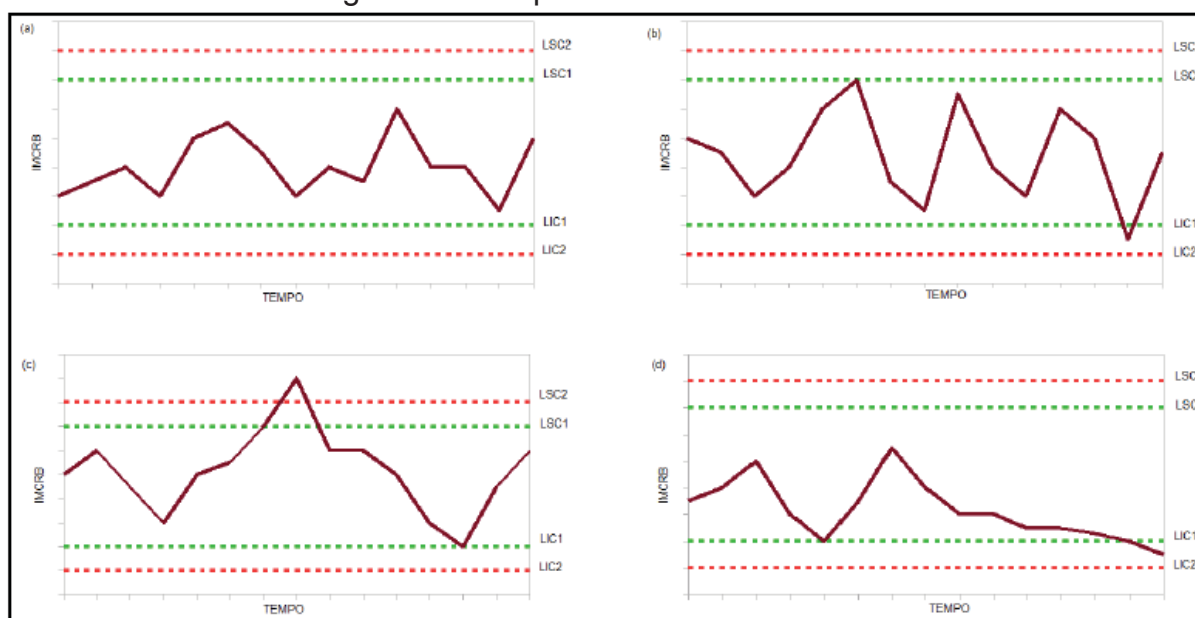
Os limites de confiança para uma carta de controle, para medidas individuais de uma variável, podem ser usados como limites de controle para a média, conforme é apresentado pelas Equações 4 e 5 (CHAVES NETO E CHAVES, 2014).

$$LIC = \bar{x} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$LIC = \bar{x} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

A figura 4 apresenta alguns exemplos de cartas de controle.

Figura 4: Exemplos de cartas de controle



FONTE: ORO (2016)

As cartas de controle apresentadas em (a) e (b) têm comportamentos estáveis e previsíveis. As cartas de controle apresentadas em (c) e (d) representam um processo fora de controle.

Relacionadas à série do IMCRB, Oro (2016) elaborou 7 possíveis causas em caso da existência de anormalidades apresentadas em uma carta de controle, denominadas como  $C_1$ ,  $C_2$ , ...,  $C_7$ , que são apresentadas na sequência.

- $C_1$  – Valores extremos para as condições ambientais;
- $C_2$  – Instrumentos com defeito ou em manutenção;
- $C_3$  – Erros de medição;
- $C_4$  – Calibração de instrumentos;
- $C_5$  – Envelhecimento da estrutura;
- $C_6$  – Dano pontual na estrutura da barragem;
- $C_7$  – Dano global na estrutura da barragem.

Diante disso, Oro (2016) interpreta cada uma das cartas de controle da Figura 4, conforme é mostrado no quadro 1 a seguir.

Quadro 1: Possíveis causas para o comportamento de uma carta de controle

| Carta de controle para o IMCRB | Possíveis causas  |
|--------------------------------|---|
|                                |   |
| Caso (a) – Sob controle        | -   |
| Caso (b) – Sob controle        | -   |
| Caso (c) – Fora de controle    | { $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ }                                 |
| Caso (d) – Fora de controle    | { $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ , $C_4$ , $C_5$ , $C_6$ , $C_7$ } |

FONTE: Adaptado de ORO (2016).

No entanto, Oro (2016) salienta que as causas listadas são sugestivas, e foram baseadas nas principais ocorrências citadas na literatura e nas informações recebidas durante as visitas técnicas, sendo necessário estudos mais minuciosos, em caso de anormalidades, acerca das condições de segurança da barragem, para que as medidas cabíveis possam ser tomadas.

#### 2.4.3 Gráfico de Controle da Soma Acumulada (CUSUM)

Cartas de controle são muito utilizadas para detectar grandes desvios da média do processo ou aumentos significativos na variância. O gráfico de controle da Soma

Acumulada – CUSUM é utilizado quando se pretende detectar pequenas mudanças na média do processo, entretanto perde eficiência em processos mais robustos.

Esta ferramenta estatística acumula toda a informação das amostras de um processo atribuindo igualmente pesos a cada uma delas, plotando as somas acumuladas dos desvios dos valores da amostra em relação a uma média.

A série para construir o gráfico CUSUM se dá como mostra a equação 6.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x} - \mu_0) = (\bar{x}_i - \mu_0) + C_{i-1} \quad (6)$$

Onde:

- $\bar{x}_i$  é a média da i-ésima amostra;
- $\mu_0$  é a média do processo.

Particularmente, o gráfico CUSUM é mais eficaz com amostras de tamanho  $n=1$ , isto é, quando são coletadas amostras individuais com um valor por medição (Equação 7).

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) = (x_i - \mu_0) + C_{i-1} \quad (7)$$

Onde:

- $x_i$  é o i-ésimo valor observado;
- $\mu_0$  é a média do processo.

O comportamento do gráfico dependerá da média  $\mu$ . Enquanto  $\mu$  permanecer ajustada,  $C_i$  oscilará aleatoriamente em torno de 0. Quando  $\mu$  for alterada,  $C_i$  crescerá, ou decrescerá, indefinidamente.

A decisão sobre a situação ou estado do processo se baseia nas informações de várias amostras anteriores e não apenas na última. Desta forma é possível identificar com maior rapidez pequenos desajustes na média do processo, assim como o período e o momento em que ocorre a mudança (CRUZ et al, 2009; MONTGOMERY, 2004; HENNING, 2009, apud CHAGAS, RUSSO e SIMON, 2012).

#### 2.4.4 Séries Temporais

Uma série temporal é um conjunto de observações feitas em intervalos regulares, ou não, de tempo e que abrangem um período de tempo.

De acordo com Chaves Neto (2014), “uma série temporal  $Z_t$  é uma realização do processo estocástico<sup>2</sup>  $Z(\omega, t)$ , onde  $t \in T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  com  $t_i - t_j = h, \forall i \neq j$ , é o tempo.

Utilizando decomposição de componentes, Box e Jenkins (1976) discorrem que uma série temporal  $Z_t, t = 1, 2, \dots, n$ , pode ser escrita como a soma de três componentes: tendência ( $T_t$ ), sazonalidade ( $S_t$ ) e a componente aleatória ( $a_t$ ), assim tem-se a série como apresentada na Equação 8.

$$Z_t = T_t + S_t + a_t; \quad \text{com } t = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Uma série temporal pode apresentar uma tendência que pode ser entendida como um comportamento de crescimento ou decrescimento dos valores registrados com o tempo. E, ainda, uma série temporal pode se comportar com sazonalidade que é entendida como valores bastante acima, ou abaixo, da média em períodos aproximadamente fixos de tempo (CHAVES NETO, 2014).

“Uma série temporal é dita estacionária quando tem média e variância constante e a função de autocovariância entre dois períodos distintos depende apenas da defasagem de tempo entre os períodos” (CHAVES NETO, 2014).

Quando uma série é não estacionária, pode ser possível torná-la estacionária após troca do nível médio ou inclinação, por diferenciação.

#### 2.4.5 Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem

O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem – IMCRB é um valor adimensional, representada por uma série temporal, que apresenta de forma conjunta os dados das medições dos sensores da instrumentação instalada em determinado bloco de uma barragem.

Oro (2016) elaborou o modelo para o IMCRB utilizando a média ponderada dos fatores, considerando como pesos os autovalores da matriz de correlação.

---

<sup>2</sup> Um processo estocástico  $Z(w, t)$  (função de duas variáveis  $w$  e  $t$ ) é uma família  $Z = \{Z_t, t = 1, 2, 3, \dots, n\}$  tal que, para cada  $t$ ,  $Z_t$  é uma variável aleatória.

A Equação 9 apresenta o modelo para o IMCRB, sendo que os escores fatoriais padronizados são valores de entrada para o índice.

$$IMCRB_i = \frac{\lambda_k f_{ik}}{p}, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Onde:

- $\lambda_k$  é o  $k$ -ésimo autovalor da matriz de correlações;
- $f_{ik}$  é o  $i$ -ésimo escore do  $k$ -ésimo fator extraído;
- $p$  é o número variáveis originais (sensores);
- $n$  é o número de observações tomadas para cada variável.

## 2.5 RECURSOS COMPUTACIONAIS

O software R é um programa livre, com código fonte aberto, que pode ser utilizado nas plataformas Windows e Unix.

“É uma linguagem com foco em análises estatísticas e gráficas”. Composto por implementações de técnicas estatísticas (modelos lineares e não-lineares, testes estatísticos, análise de séries temporais, análise multivariada), e técnicas gráficas. Possui facilidade, robustez e qualidade na produção de análises e gráficos (LOPES, 2018).

O Software MATLAB é um software para análises estatísticas e de pesquisa operacionais, além de cálculo em álgebra linear, com uma linguagem de programação própria, cujo elemento básico de informação é uma matriz. Os aplicativos do Matlab permitem ver como diferentes algoritmos funcionam com mesmos dados. Pode-se fazer iteração até obter os resultados desejados e gerar automaticamente um programa para reproduzir ou automatizar o processo (Adaptado de MATHWORKS, 2018).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 TIPO DE PESQUISA**

Do ponto de vista dos objetivos, este trabalho é caracterizado como exploratório e descritivo. É exploratório, pois busca adquirir familiaridade com o tema de segurança e instrumentação de barragens, alguns métodos estatísticos utilizados, como método de análise multivariada, e dos Softwares R e Matlab. É descritivo, pois pretende descrever os resultados das análises realizadas da aplicação de métodos estatísticos em dados da instrumentação da Barragem de Itaipu. A pesquisa descritiva, de acordo com Gil (2008, p. 28), "têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis".

Quanto a abordagem, caracteriza-se esta pesquisa como quali-quantitativa, por abordar um estudo de análise estatística de dados, prosseguindo com uma análise subjetiva de significados envolvidos em determinada problemática.

De acordo com os procedimentos utilizados pode-se identificar a presente pesquisa como experimental, a qual é caracterizada por manipular as variáveis de estudo, de modo a compreender a maneira que certo fenômeno é produzido.

#### **3.2 FLUOXOGRAMA DO MÉTODO**

O fluxograma (Fig. 5 e 6) apresenta a sequência dos passos a serem realizados para a replicação do método.

Figura 5: Fluxograma do método (parte 1)

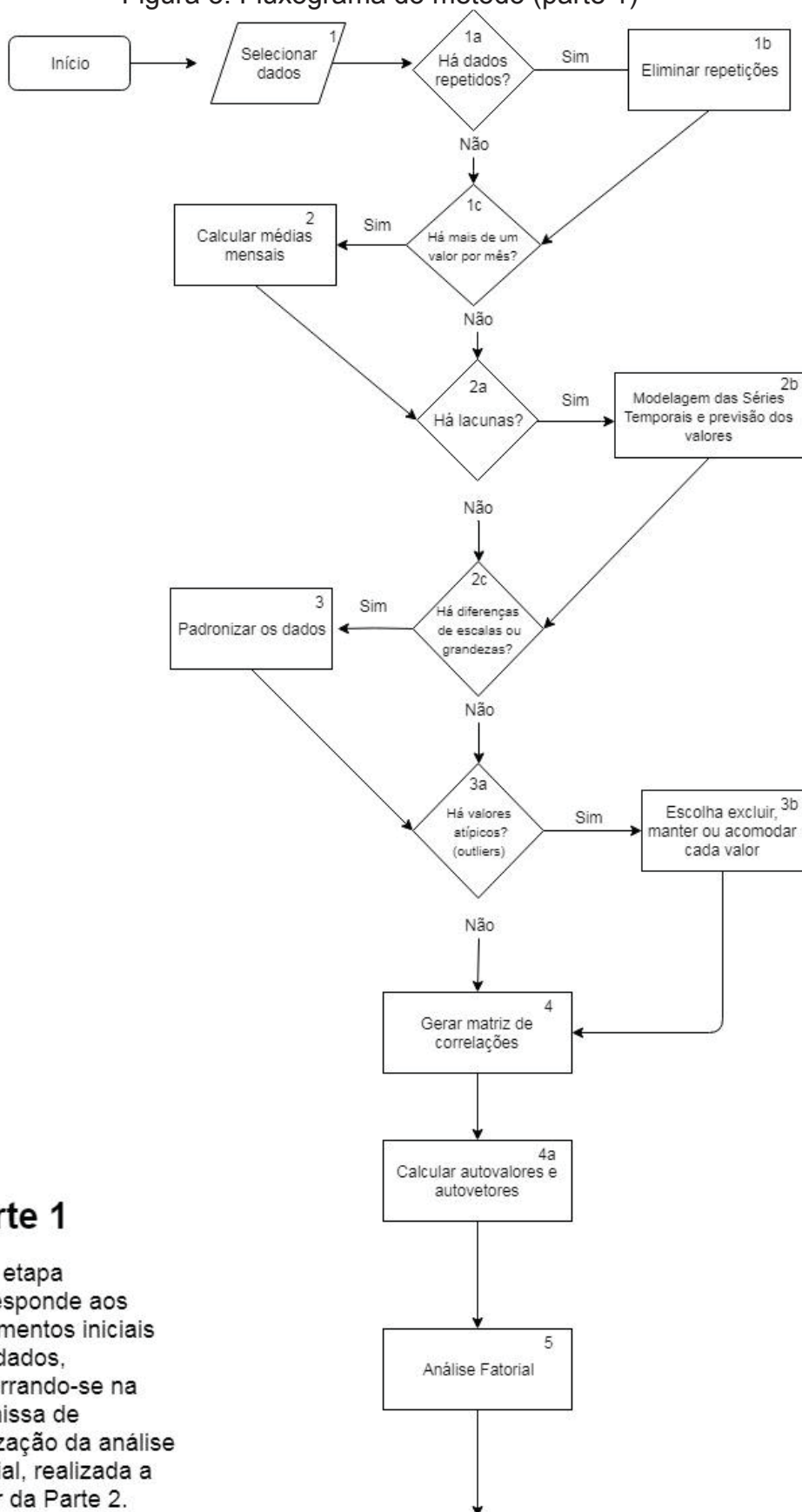
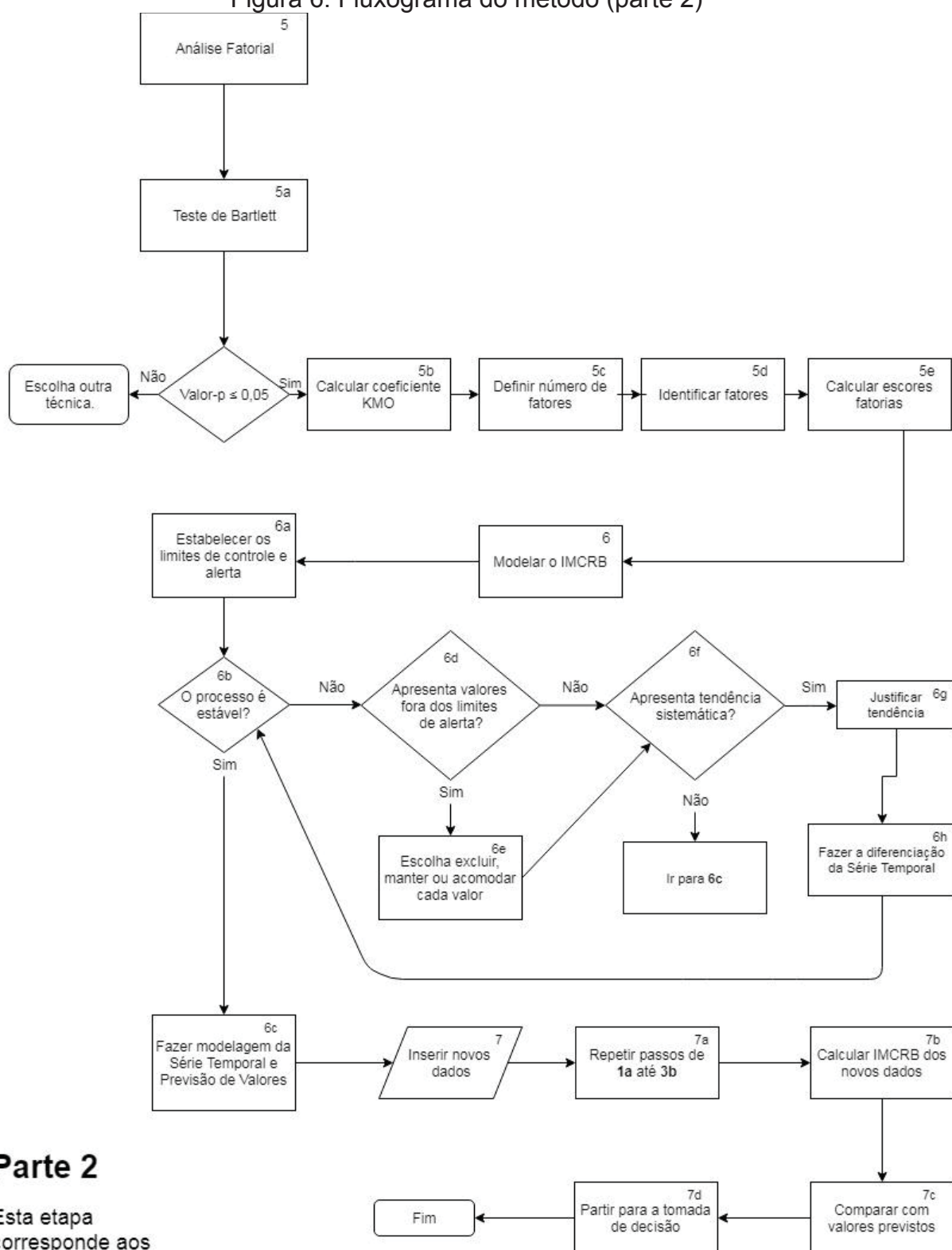




Figura 6: Fluxograma do método (parte 2)

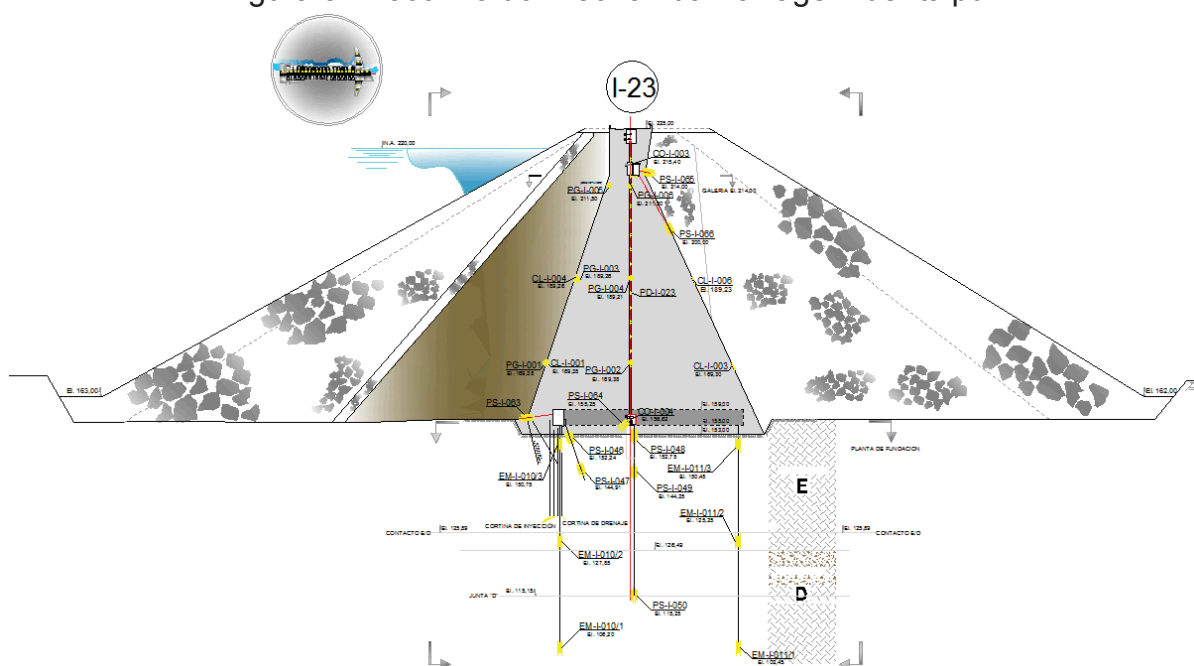


## Parte 2

Esta etapa corresponde aos procedimentos de análise fatorial e modelagem do IMCRB.



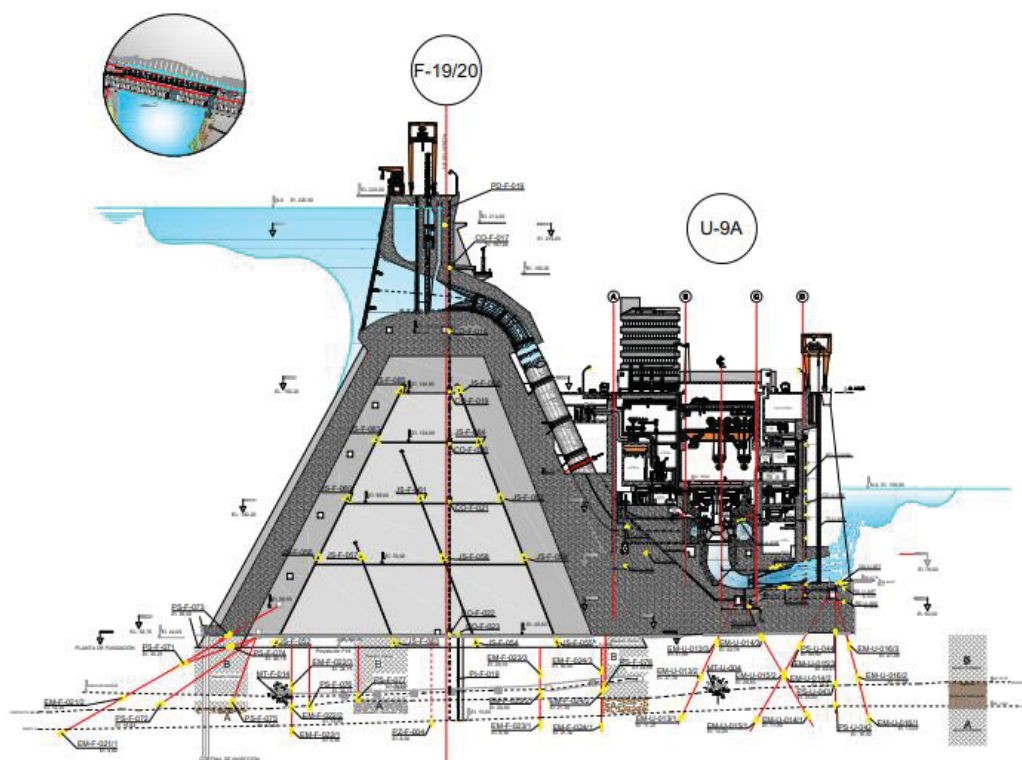
Figura 8: Bloco I23 do Trecho I da Barragem de Itaipu



FONTE: CEASB (2018)

O bloco F19/20 (Fig. 9) foi contruído do tipo gravidade aliviada, possuindo a altura máxima de 196 metros. Este bloco está localizado na barragem principal de Itaipu.

Figura 9: Bloco F19/20 do Trecho F da Barragem de Itaipu



FONTE: CEASB (2018)

Os dados foram fornecidos pelo CEASB, juntamente com outras informações pertinentes para a pesquisa, como a localização dos sensores em cada bloco, tipos de medição de cada sensor, entre outros.

O período estudado ficou compreendido entre janeiro de 1990 e dezembro de 2017, para os dados dos blocos F19/20 e I23, e janeiro de 1993 e dezembro de 2017, para os dados do bloco I10, por motivo de alguns instrumentos deste último bloco não possuírem medições registradas nos anos de 1990 à 1992.

As informações coletadas foram referentes às medições manuais dos sensores dos instrumentos: pêndulo direto e invertido, bases de alongâmetro, extensômetros múltiplos de hastes e piezômetros.

### 3.4 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados foram recebidos em formato de planilha contendo o nome do instrumento, número do sensor, medição e grandeza. Eles foram separados por sensores e então realizadas algumas análises que seguem na sequência.

Para a pesquisa considerou-se uma medição por mês de cada sensor analisado, porém alguns instrumentos apresentaram mais de um valor em cada mês. Essa ocorrência pode ser resultado de um monitoramento mais frequente daquele sensor em um determinado período. Para que todos os sensores permanecessem com a mesma quantidade de dados, foram calculadas as médias mensais dos dados de cada sensor, formando uma planilha denominada matriz de médias, na qual cada coluna representou um sensor e cada linha uma data (mês) de medição, dentro do período de estudo.

Esta etapa foi realizada com os dados da instrumentação de cada bloco estudado, gerando portanto três matrizes de médias, a primeira com 336 linhas e 36 colunas, referente ao Bloco F19/20, a segunda com 336 linhas e 27 colunas, referente ao Bloco I10, e a terceira com 300 linhas e 23 colunas, referente ao Bloco I23.

Para calcular a matriz de médias de cada bloco, utilizou-se um código do Matlab (Anexo 1), desenvolvido por Oro (2016), no qual a matriz de dados é inserida e retorna com a matriz de médias mensais dos sensores de cada bloco.

Após a geração da matriz de médias foram identificadas lacunas, originadas da ausência de medição naquele mês. Essa ausência podem acontecer devido a falhas na medição do leitorista, o não armazenamento da informação no sistema, entre outros motivos. Cada valor da amostra altera o valor da média amostral dos dados, diante disso as lacunas identificadas foram preenchidas utilizando a técnica de interpolação linear<sup>3</sup>.

A instrumentação utilizada para este trabalho apresentou grandezas diferentes, como por exemplo, milímetros (mm) e metros sob o nível do mar (msnm), logo alguns dados apresentaram valores bastante distantes um dos outros. Para que a diferença de grandeza não interfira nas análises posteriores, os dados foram padronizados utilizando a Equação 10.

$$\vec{Z}_i = \frac{\vec{X}_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (10)$$

Onde  $\vec{X}_i$  é o vetor que contém as observações do sensor considerado  $i$ ,  $\mu_i$  é a média histórica, no período de estudo, dos valores deste sensor,  $\sigma_i$  é o desvio

---

<sup>3</sup> Calculada pela média entre os valores, anterior e posterior, à lacuna.

padrão, e  $\bar{Z}_i$  é o vetor que contém as observações padronizadas. Desta forma todas as medições são representadas pela média 0 e desvio padrão 1, com a mesma ordem de grandeza.

Observou-se na matriz de médias dos dados, alguns valores atípicos muito altos, ou baixos, em comparação com os demais. Esses valores são conhecidos na literatura como outliers e podem influenciar negativamente no resultado de uma análise de dados. Em vista disso, cada outlier encontrado foi interpretado e, posteriormente, substituído por outro valor utilizando novamente a interpolação linear.

Nesta etapa do processo, a matriz de dados foi dividida em duas partes, com dados até dezembro de 2015, usados para a aplicação do método e denominados como dados da primeira fase, e dados entre janeiro de 2016 à dezembro de 2017, usados para a validação do método e denominados como dados da segunda fase.

### 3.5 ANÁLISE FATORIAL

Para cada matriz de médias padronizadas, referentes aos dados da primeira etapa, gerou-se a matriz de correlação utilizando o Software R (2017). Essa matriz apresentou o grau de correlação entre os sensores, variando entre -1 e 1, sendo que próximo de 0 a correlação entre as variáveis é baixa, próximo de 1 é alta positiva, e próximo de -1 é alta negativa ou inversa.

Foram determinados autovalores a partir dos dados de cada matriz de correlação, com seus respectivos autovetores, com quantidade igual ao número de colunas da matriz utilizada, sendo que cada coluna refere-se a um sensor. Isto é, o número de autovalores determinados na matriz de correlação é igual ao número de sensores utilizados para as análises.

Os autovalores determinados têm grande importância para a análise fatorial, pois indica a porcentagem da variância explicada por cada fator identificado na análise fatorial.

Para que a análise fatorial possa ser realizada, é necessário realizar alguns testes para aferir se sua utilização é adequada para a amostra de dados estudada.

O teste de esfericidade de Bartlett permite identificar se a matriz de correlação é significativa, isto é, pode-se rejeitar a hipótese de que a matriz de correlação é igual a matriz identidade. O teste realizado no Software R (2017) para os dados referentes aos três blocos estudados retornou em matrizes significativas, devido ao fato do valor-

p associado a estatística T calculada resultar, nos três casos, em valores menor ou igual a 0,05, com nível de significância de 5%.

O coeficiente Kaiser Meyer Olkin (KMO) apresentou a medida de adequacidade para a análise fatorial com os dados dos blocos F19/20, I10 e I23, os quais mediram respectivamente 0,9296002; 0,9165157 e 0,857164. De acordo com a literatura, para que os dados sejam adequados para a análise, é necessário que os mesmos sejam maiores do que 0,6, e ainda quanto mais próximo de 1, melhor é a adequacidade. Percebe-se então que os dados dos três blocos estudados se mostraram adequados, e desta forma a análise fatorial pode ser realizada.

A análise fatorial permite agrupar as informações de todos os sensores de cada bloco em conjuntos menores de fatores com o mínimo de perda de informação possível. Realizando a análise fatorial no Software R (2017), obteve-se 6 fatores para o Bloco F19/20 e 5 fatores para ambos os blocos I10 e I23. O número de fatores foi escolhido de acordo com o Critério de Kaiser, no qual o número de fatores a ser utilizado é igual à quantidade de autovalores maiores ou iguais a 1,0.

Cada fator apresentou o comportamento de um conjunto de sensores da instrumentação que apresentam correlação entre si. Esse conjunto de sensores dará a característica do fator de acordo com a porcentagem de explicação que cada variável representa. Cada fator é uma combinação linear dos sensores, sendo que o peso de cada sensor é a sua carga fatorial.

Com a análise fatorial gerou-se os escores fatoriais para cada bloco analisado. Os escores são valores estimados dos fatores, e foram utilizados como variável de entrada para a geração do índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem (IMCRB).

O Script utilizado para realizar as etapas da análise fatorial no Software R foi desenvolvido e utilizado em Oro (2016) e se encontra em anexo (Anexo 2).

### 3.6 SÉRIES PARA O IMCRB

O Índice de Monitoramento Conjunto das Respostas dos Blocos da Barragem – IMCRB representa o comportamento global de um conjunto de dados. Ele foi modelado em Oro (2016) utilizando técnicas estatísticas, e é apresentado na Equação 11.

$$IMCRB_i = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k f_{ik}}{p}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

onde:

$\lambda_k$  = k-ésimo autovalor da matriz de correlações;

$f_{ik}$  = i-ésimo escore do k-ésimo fator extraído;

$p$  = quantidade de sensores utilizados (número de variáveis);

$n$  = número de observações tomadas para cada sensor.

Utilizando os escores fatoriais como dados de entrada para o índice, gerou-se três séries para o IMCRB, de mesmo tamanho que o número de observações de cada sensor, representando o comportamento estrutural de cada um dos três blocos estudados.

Para o caso em que a série do IMCRB apresentou tendência, para torná-la estacionária, as séries dos fatores de cada bloco foram diferenciados utilizando o auxílio do Software R, e então novamente os índices foram calculados.

A diferenciação da série no Software R é realizada utilizando o modelo autorregressivo integrado de médias móveis – ARIMA(p,d,q), onde  $p$  é o parâmetro do modelo AR,  $d$  é o número de diferenciações realizadas e  $q$  é o parâmetro do modelo MA.

### 3.7 CARTAS DE CONTROLE

Com cada uma das séries do IMCRB, foram estipulados limites de confiança a dois e a três desvios padrões, denominados neste estudo como limite de controle, à 95% de confiança e limite de alerta, à 99% de confiança, respectivamente. Os níveis de confiança representam a probabilidade de que na repetição desta modelagem utilizando os mesmos sensores, tenhamos os mesmos resultados.

O cálculo dos limites de confiança, inferior e superior, denominados como LIC e LSC, respectivamente, são realizados utilizando a equação 12.

$$\begin{aligned} LIC_1 &= \mu_{IMCRB} - 2\sigma_{IMCRB} \\ LSC_1 &= \mu_{IMCRB} + 2\sigma_{IMCRB} \\ LIC_2 &= \mu_{IMCRB} - 3\sigma_{IMCRB} \end{aligned} \quad (12)$$



$$LSC_2 = \mu_{\text{IMCRB}} + 3\sigma_{\text{IMCRB}}$$

Onde  $\mu$  é a média histórica de cada série do IMCRB obtida e  $\sigma$  seu desvio padrão.

Utilizando cada uma das séries do IMCRB e seus limites de controle e alerta estipulados, gerou-se três cartas de controle para o índice, uma para cada bloco.

As cartas de controle são usadas para identificar valores fora dos limites estipulados como de confiança, afim de analisar se o processo está sob controle.

Após isso, utilizando a série para o IMCRB de cada bloco, gerou-se gráficos de controle da soma acumulada – CUSUM, os quais colaboraram para as interpretações do comportamento de cada série para o IMCRB.

### 3.8 INSERÇÃO DOS DADOS NOVOS

Com os dados da segunda etapa, foram estimados os escores fatoriais para cada bloco utilizando a Equação 13.

$$\vec{f}_i = (L'_z L_z)^{-1} L'_z z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Onde:

- $\vec{f}_i$  é o vetor que contém os escores;
- $L_z$  é a matriz de cargas;
- $z_i$  é a matriz padronizada dos dados da segunda etapa.

Os novos escores foram utilizados para a geração de uma nova série para o IMCRB, a qual foi inserida na carta de controle para o IMCRB de seu respectivo bloco. Por fim realizaram-se análises acerca do comportamento das séries nas cartas de controle.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 BLOCOS F19/20 DO TRECHO F DA BARRAGEM DE ITAIPU

Foram analisados 36 sensores referentes à instrumentação dos blocos F19/20, entre o período de janeiro de 1990 à dezembro de 2017, os quais foram renomeados como variáveis  $X_1$ ,  $X_2$ , ...,  $X_{36}$ , referentes aos instrumentos: pêndulo direto e invertido, extensômetro múltiplos de haste, base de alongâmetro e piezômetro.

As medidas descritivas para os dados destas variáveis estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Medidas descritivas Bloco F19/20

| Tipo de Instrumento | Instrumento | Média $\pm$ Desvio Padrão | Unidade de medida |
|---------------------|-------------|---------------------------|-------------------|
| Pêndulo Direto      | $X_1$       | $1,94 \pm 0,47$           | mm <sup>4</sup>   |
| Pêndulo Direto      | $X_2$       | $2,02 \pm 0,37$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_3$       | $2,75 \pm 0,92$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_4$       | $0,86 \pm 0,31$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_5$       | $4,69 \pm 1,42$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_6$       | $-0,72 \pm 0,44$          | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_7$       | $7,03 \pm 1,73$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_8$       | $-1,14 \pm 0,45$          | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_9$       | $9,45 \pm 1,86$           | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_{10}$    | $-0,64 \pm 0,45$          | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_{11}$    | $14,39 \pm 2,17$          | mm                |
| Pêndulo Direto      | $X_{12}$    | $-1,91 \pm 0,28$          | mm                |
| Pêndulo Invertido   | $X_{13}$    | $3,53 \pm 0,34$           | mm                |
| Pêndulo Invertido   | $X_{14}$    | $1,79 \pm 0,23$           | mm                |
| Extensômetro        | $X_{15}$    | $5,06 \pm 0,24$           | mm                |
| Extensômetro        | $X_{16}$    | $5,71 \pm 0,22$           | mm                |
| Extensômetro        | $X_{17}$    | $-11,29 \pm 0,30$         | mm                |

---

<sup>4</sup> Milímetros

|                        |          |                    |                   |
|------------------------|----------|--------------------|-------------------|
| Extensômetro           | $X_{18}$ | $-9,07 \pm 0,29$   | mm                |
| Extensômetro           | $X_{19}$ | $-7 \pm 0,26$      | mm                |
| Extensômetro           | $X_{20}$ | $-8,20 \pm 0,16$   | mm                |
| Extensômetro           | $X_{21}$ | $-6,91 \pm 0,16$   | mm                |
| Extensômetro           | $X_{22}$ | $-9,26 \pm 0,15$   | mm                |
| Extensômetro           | $X_{23}$ | $-7,08 \pm 0,13$   | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{24}$ | $1,31 \pm 0,05$    | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{25}$ | $-0,45 \pm 0,02$   | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{26}$ | $1,27 \pm 0,04$    | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{27}$ | $-2,09 \pm 0,09$   | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{28}$ | $0,52 \pm 0,32$    | mm                |
| Base de<br>alongâmetro | $X_{29}$ | $-0,27 \pm 0,02$   | mm                |
| Piezômetro             | $X_{30}$ | $148,77 \pm 7,53$  | msnm <sup>5</sup> |
| Piezômetro             | $X_{31}$ | $89,74 \pm 6,75$   | msnm              |
| Piezômetro             | $X_{32}$ | $139,22 \pm 20,46$ | msnm              |
| Piezômetro             | $X_{33}$ | $97,44 \pm 13,39$  | msnm              |
| Piezômetro             | $X_{34}$ | $35,67 \pm 2,22$   | msnm              |
| Piezômetro             | $X_{35}$ | $18,98 \pm 0,12$   | msnm              |
| Piezômetro             | $X_{36}$ | $19,28 \pm 0,12$   | msnm              |

FONTE: Autoria própria

Os dados das medições da instrumentação deste bloco apresentaram grandezas diferentes e por isso foram padronizados, resultando valores com média 0 e desvio padrão 1.

Após o tratamento dos dados, a matriz das médias padronizadas foi enviada para o Software R e iniciado os testes para realizar a análise fatorial.

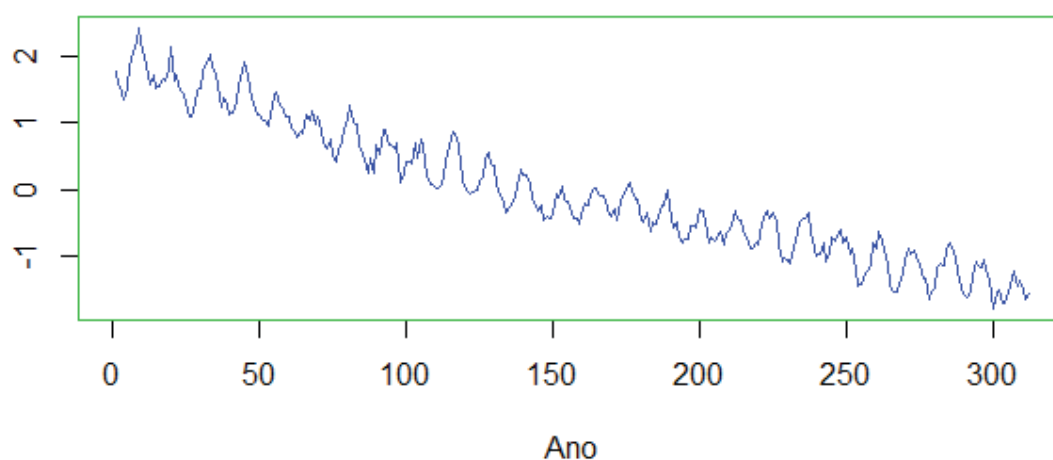
---

<sup>5</sup> Metros sobre o nível do mar

O teste de adequabilidade para a análise fatorial resultou em um índice KMO = 0,9296002, o qual superou o mínimo estipulado de 0,6. Isso mostrou que é adequado realizar a análise fatorial nos dados estudados.

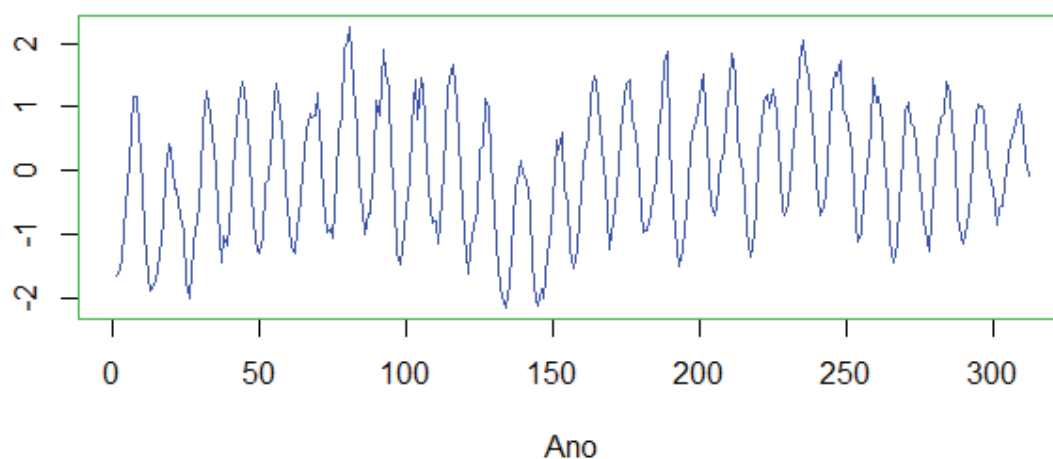
A análise fatorial foi realizada com 6 fatores, quantidade determinada pelo critério de Kaiser. As séries temporais dos fatores são apresentadas em forma de gráficos nas figuras de 10 à 15.

Figura 10: Série temporal do primeiro fator



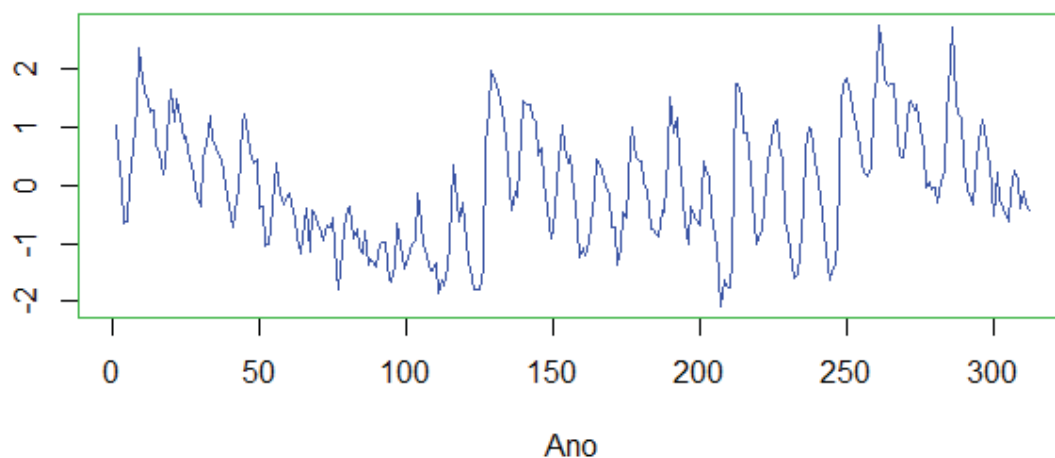
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 11: Série temporal do segundo fator



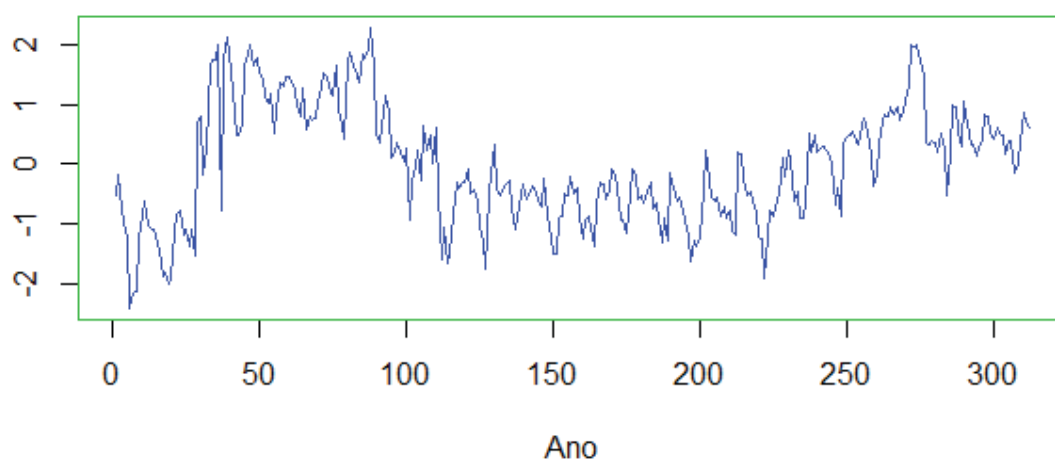
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 12: Série temporal do terceiro fator



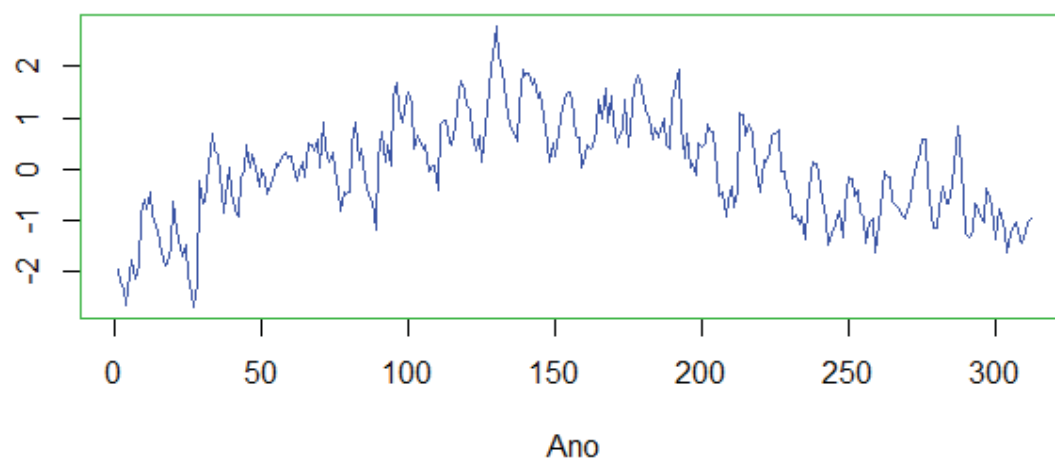
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 13: Série temporal do quarto fator



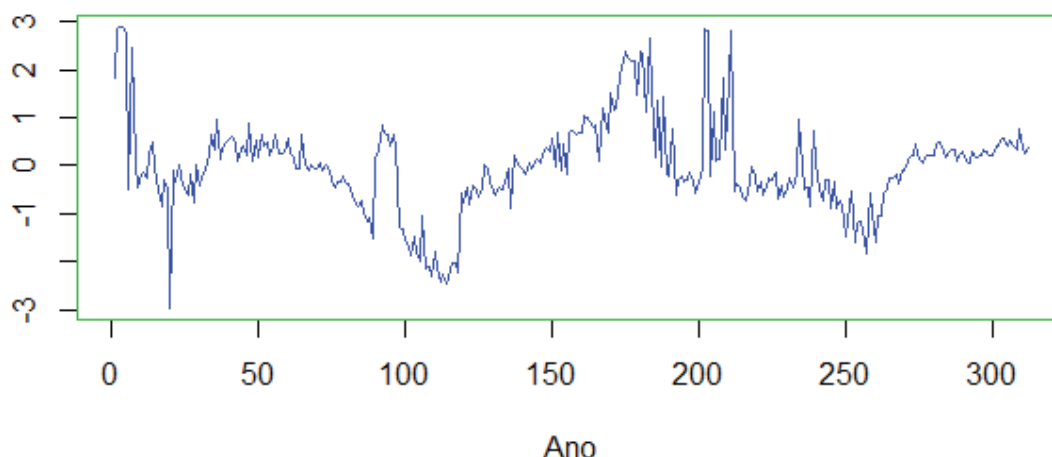
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 14: Série temporal do quinto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 15: Série temporal do sexto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

Os 6 fatores determinados corresponderam por 87,64% de explicação total dos dados.

O primeiro fator correspondeu por 38,19% de explicação total, sendo este o fator de maior importância. Os sensores correlacionados com esse fator são: nove hastes de extensômetros, três pêndulos diretos, sendo dois na direção X (montante-jusante) e um na direção Y (normal ao fluxo com a obreira direita), três piezômetros e uma base de alongâmetro, a qual mede o recalque. As comunalidades apresentadas neste fator mostraram que os sensores que apresentaram maior importância, no que diz respeito a movimentação da estrutura deste bloco, são os extensômetros X<sub>15</sub>, X<sub>17</sub>, X<sub>18</sub>, X<sub>19</sub>, X<sub>20</sub>, X<sub>21</sub>, X<sub>22</sub> e X<sub>23</sub>, e a base de alongâmetro X<sub>27</sub>, a qual mede o recalque do bloco. Em relação as subpressões, os piezômetros com maior importância foram: X<sub>34</sub>, X<sub>30</sub> e X<sub>31</sub>. As comunalidades apresentadas para esses sensores ficaram todas acima de 0,90.

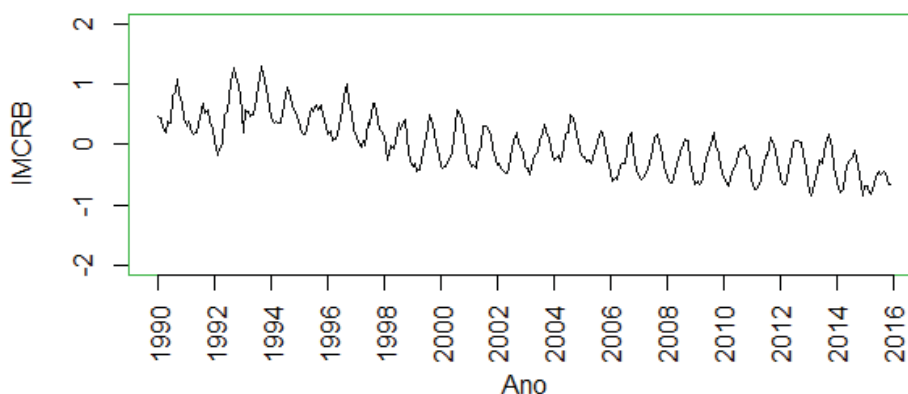
O segundo fator apresentou uma porcentagem de 16,38% de explicação total, sendo este o segundo fator de maior importância, representado por cinco pêndulos diretos, todos na direção X (montante-jusante), e uma base de alongâmetro, a qual mede a abertura entre blocos. As comunalidades dos sensores X<sub>3</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>7</sub>, X<sub>9</sub> e X<sub>11</sub>, relacionados aos pêndulos, foram as mais representativas neste fator, ficando acima de 0,93.

A série do primeiro fator apresentou tendência sistemática decrescente na média com baixa variabilidade nos dados, logo, por ser o fator de maior importância, esse comportamento será identificado no índice.

As porcentagens de explicação dos demais fatores ficaram da seguinte maneira: terceiro fator com 10,24% de explicação, quarto com 9,92% de explicação, quinto com 7,40% de explicação e sexto com 5,51% de explicação total. As comunalidades dos demais sensores foram consideradas altas, por ficarem iguais ou superiores a 0,55, o que significa que todas as variáveis (sensores) são bem representadas pelo modelo fatorial.

Com a análise fatorial gerou-se os escores fatoriais, os quais serviram como dados de entrada para o IMCRB e geraram a série para o índice, conforme pode ser observado na figura 16.

Figura 16: Série para o IMCRB dos blocos F19/20



FONTE: Autoria própria (2018)

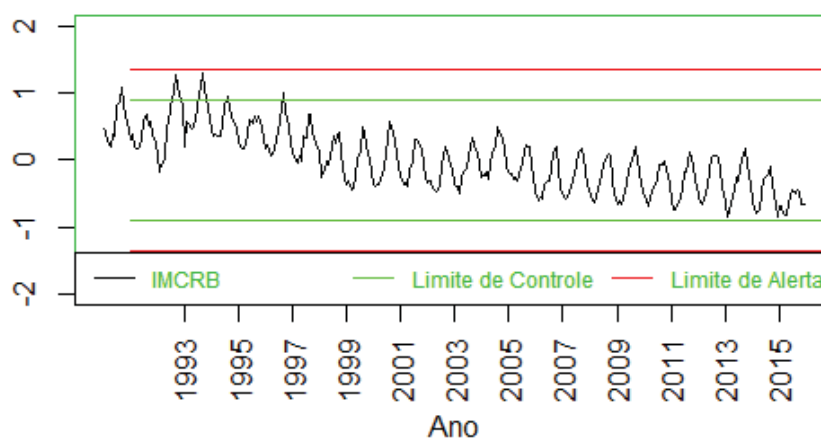
O gráfico apresentou sazonalidade, apresentadas pelas extremidades altas e baixas em períodos aproximadamente fixos de tempo. Isso pode ser explicado pela movimentação da estrutura, e das condições de subpressões registradas, em condições da mudança de temperatura durante às estações do ano.

Esta série apresentou tendência decrescente na média. Devido à forte influência dos extensômetros e pêndulos diretos na direção montante-jusante, sugere-se que esse fato pode ser ocasionado pela fluência da estrutura e fundação.

Pode-se notar que a disposição dos dados fica em torno de uma mesma média no decorrer do período analisado, isso pode indicar que os deslocamentos registrados ficam cada vez mais estáveis.

Com a série do IMCRB foram estipulados limites de confiança a 95% e 99%, denominados limites de controle e alerta, respectivamente, e então gerada uma carta de controle, como mostra a Fig. 17.

Figura 17: Carta de controle para o IMCRB dos blocos F19/20

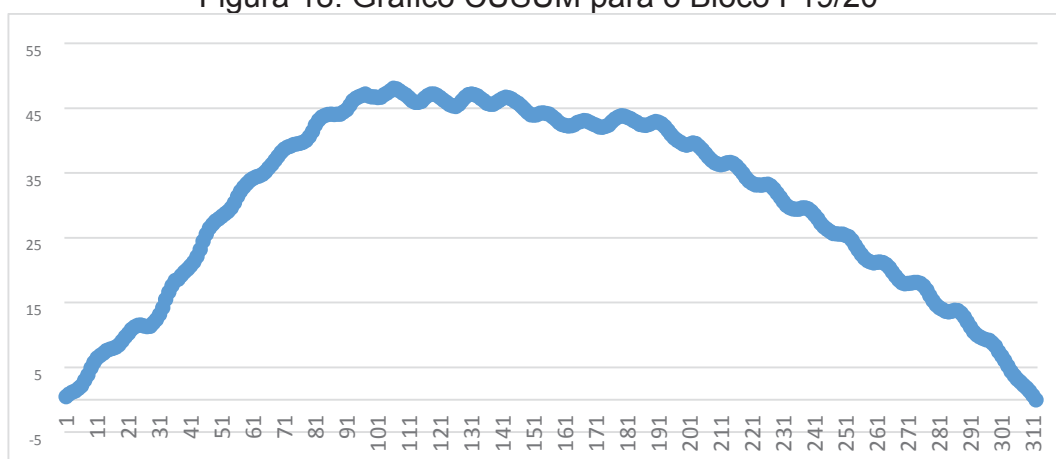


FONTE: Autoria própria (2018)

Em sua maioria, os dados ficaram distribuídos dentro dos limites estipulados como de confiança, apresentando no decorrer do tempo maior estabilidade, sendo que a partir do ano de 1997, aproximadamente, nenhum valor ficou fora dos limites.

A figura 18 apresenta o gráfico de controle da soma acumulada – CUSUM para o IMCRB do bloco F19/20, o qual mostra os desvios dos valores da amostra em relação à média do processo.

Figura 18: Gráfico CUSUM para o Bloco F19/20



FONTE: Autoria própria (2018)

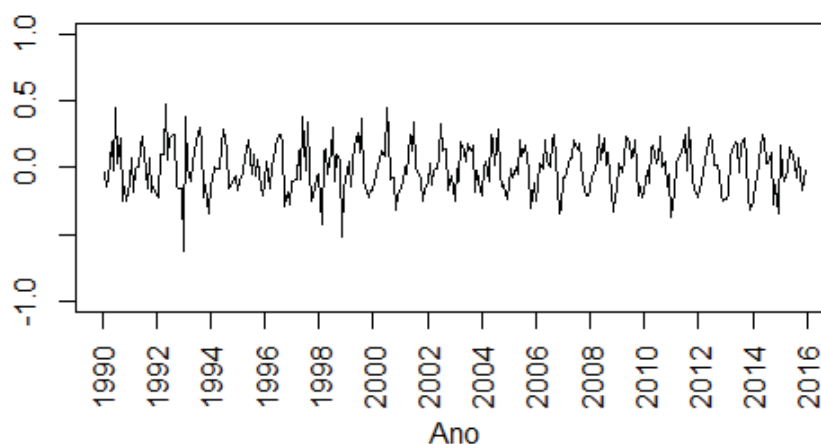
O gráfico CUSUM para esta série apresentou um formato voltado para cima. Observando o gráfico para a série do IMCRB, percebemos que esta apresentou tendência decrescente na média, iniciando a série com valores positivos. Esta ocorrência pode explicar o comportamento do gráfico CUSUM.



Por meio deste gráfico pode-se perceber no período de 1990 à 1998 uma mudança na média, a qual pode ser explicada pela tendência apresentada na série do IMCRB neste mesmo período. Entre 1998 e 2005, a média permanece sem muita variação, porém distante da média geral do processo, e a partir daí observa-se uma nova alteração, a qual também pode ser explicada pela tendência apresentada no gráfico do IMCRB neste período.

Para tornar a série estacionária na média, ela precisou ser diferenciada, como mostra a Fig. 19.

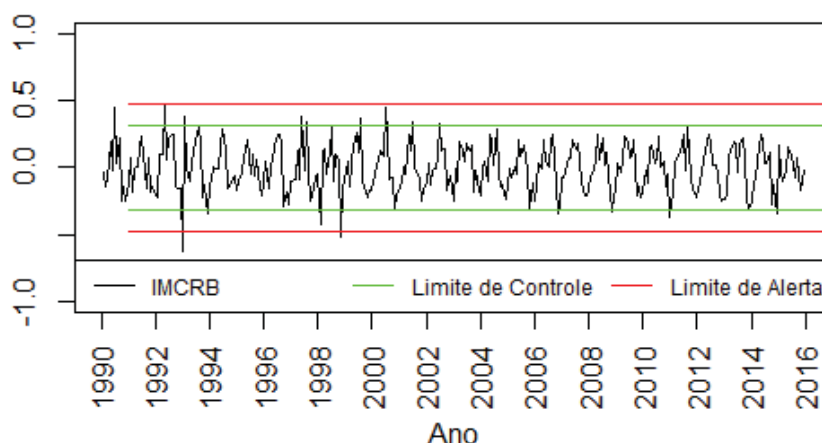
Figura 19: Série diferenciada para o IMCRB dos blocos F19/20



FONTE: Autoria própria (2018)

Com a série diferenciada foram estipulados novos limites de controle e alerta, e uma nova carta de controle foi gerada, apresentada na Fig. 20.

Figura 20: Carta de controle para a série diferenciada do IMCRB dos blocos F19/20

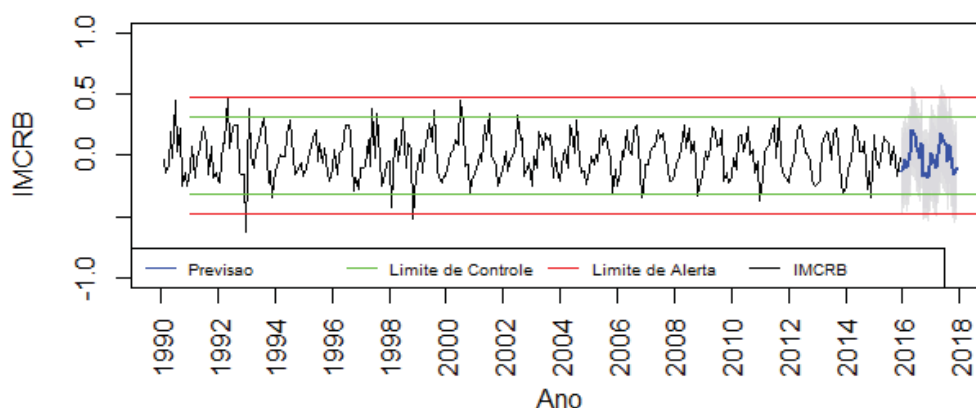


FONTE: Autoria própria (2018)

Percebe-se que, em sua maioria, os valores da série do IMCRB adequaram-se dentro dos limites de confiança. Os valores que ficaram fora dos limites mostraram um comportamento isolado dos demais, sendo que os dados no entorno mostraram-se adequados. A explicação para esse fato pode estar relacionada com algum fenômeno ocorrido nesta data, podendo significar um mês com temperatura atípica, um sismo, um rebaixamento do reservatório, ou outro evento isolado que possa intervir na movimentação da estrutura.

A carta de controle apresentada na Fig. 21 mostra, destacado nos últimos dois anos, uma previsão da série realizada para os próximos 24 meses.

Figura 21: Previsão para o IMCRB diferenciado dos blocos F19/20



FONTE: Autoria própria (2018)

Percebe-se que os valores da previsão posicionaram-se totalmente dentro dos limites de confiança. Desta forma espera-se que os valores reais da série para os

dados se ajuste da mesma forma, o que de fato acontece quando a série para os dados da segunda etapa são inseridos.

#### 4.2 BLOCO I10 DO TECHO I DA BARRAGEM DE ITAIPU

Neste bloco foram coletados dados das medições de 27 sensores, entre o período de janeiro de 1990 à dezembro de 2017. Os sensores foram renomeados como as variáveis  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{27}$ .

As medidas descritivas para estas variáveis estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Medidas descritivas bloco I10

| Instrumento         | Sensor   | Média± Desvio Padrão | Unidade de medida |
|---------------------|----------|----------------------|-------------------|
| Extensômetro        | $Y_1$    | 0,31± 0,07           | mm                |
| Extensômetro        | $Y_2$    | -0,20± 0,05          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_3$    | -0,33± 0,06          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_4$    | -0,42± 0,07          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_5$    | -0,56± 0,04          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_6$    | -0,45± 0,03          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_7$    | -0,48± 0,05          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_8$    | -0,82± 0,07          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_9$    | -0,59± 0,05          | mm                |
| Extensômetro        | $Y_{10}$ | -0,48± 0,05          | mm                |
| Base de alongâmetro | $Y_{11}$ | 0,52± 0,17           | mm                |
| Base de alongâmetro | $Y_{12}$ | -0,02± 0,02          | mm                |
| Base de alongâmetro | $Y_{13}$ | 0,39± 0,16           | mm                |
| Base de alongâmetro | $Y_{14}$ | 0,14± 0,02           | mm                |
| Base de alongâmetro | $Y_{15}$ | 0,99± 0,35           | mm                |

|                        |          |                  |      |
|------------------------|----------|------------------|------|
| Base de<br>alongâmetro | $Y_{16}$ | $0,01 \pm 0,04$  | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{17}$ | $1,55 \pm 0,76$  | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{18}$ | $-0,19 \pm 0,14$ | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{19}$ | $2,053 \pm 1,64$ | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{20}$ | $-0,38 \pm 0,26$ | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{21}$ | $3,59 \pm 2,28$  | mm   |
| Pêndulo<br>direto      | $Y_{22}$ | $-0,57 \pm 0,20$ | mm   |
| Piezômetro             | $Y_{23}$ | $164,5 \pm 0,12$ | msnm |
| Piezômetro             | $Y_{24}$ | $164,1 \pm 0,23$ | msnm |
| Piezômetro             | $Y_{25}$ | $156,7 \pm 0,57$ | msnm |
| Piezômetro             | $Y_{26}$ | $158,6 \pm 0,68$ | msnm |
| Piezômetro             | $Y_{27}$ | $163,4 \pm 0,11$ | msnm |

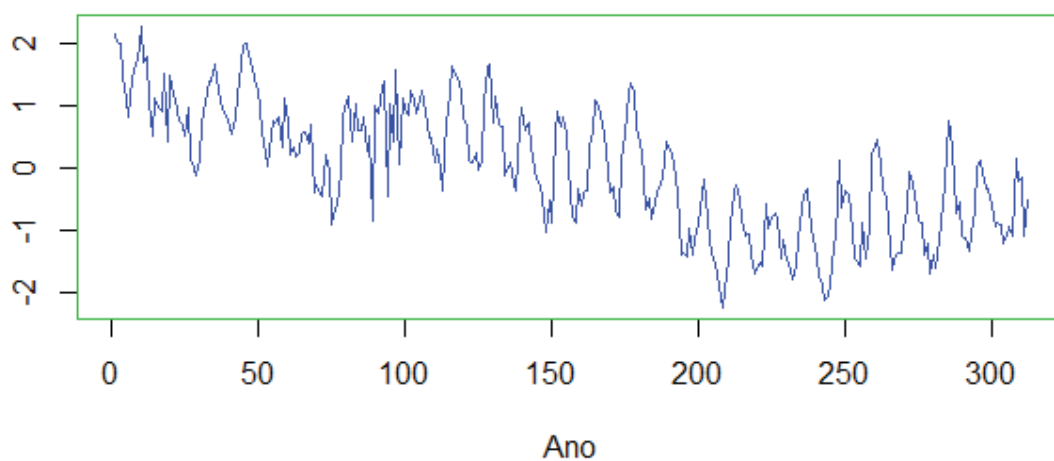
FONTE: Autoria própria

Foi realizado o tratamento dos dados com as medições deste bloco, e posteriormente a matriz de médias padronizada foi enviada para o Software R, iniciando os teste para realizar a análise fatorial.

O teste de adequabilidade Kaiser Meyer Olkin indicou que é adequado realizar a análise fatorial nos dados deste bloco, resultando em KMO = 0,9165.

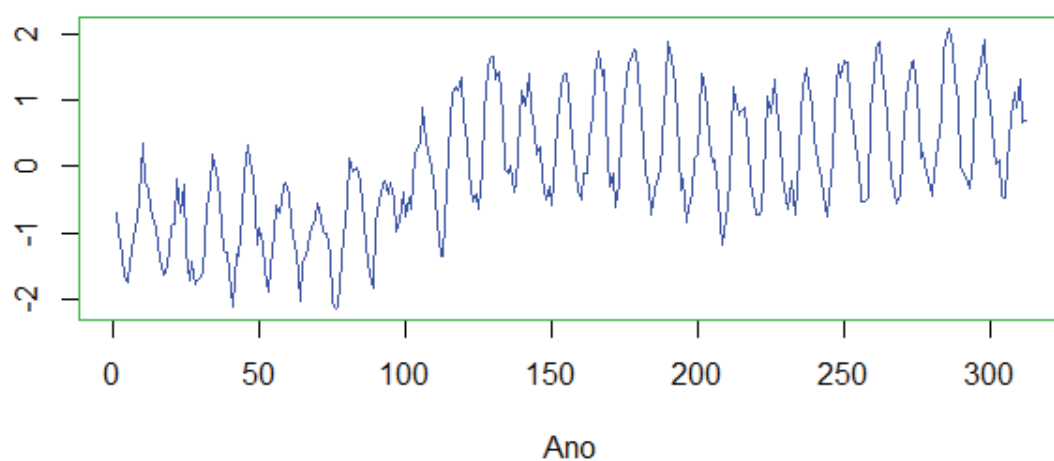
O critério de Kaiser resultou em 5 fatores para a análise. As Figuras de 22 à 26 apresentam os gráficos desses fatores.

Figura 22: Série temporal do primeiro fator



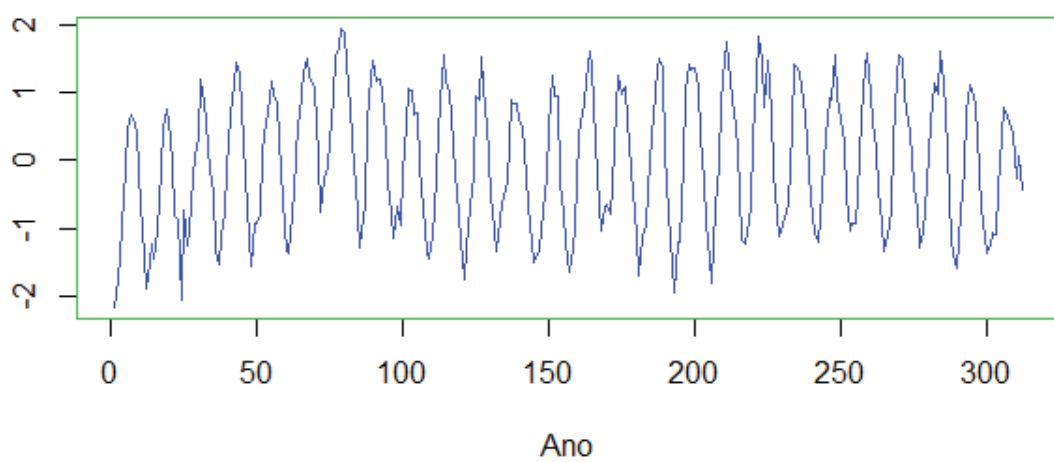
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 23: Série temporal do segundo fator



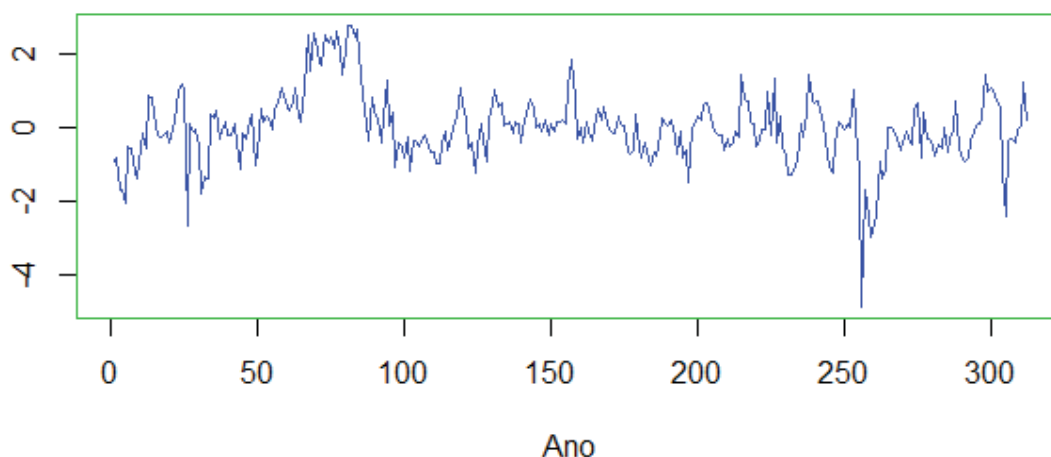
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 24: Série temporal do terceiro fator



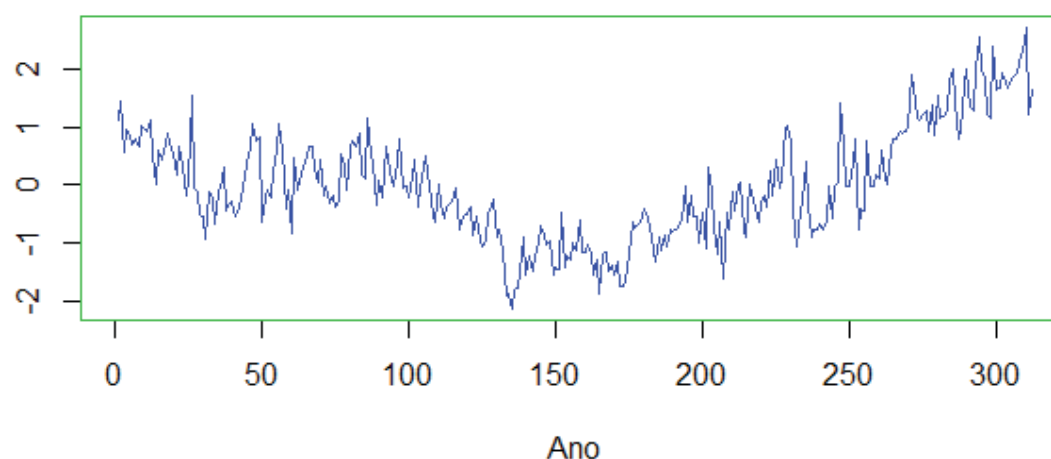
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 25: Série temporal do quarto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 26: Série temporal do quinto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

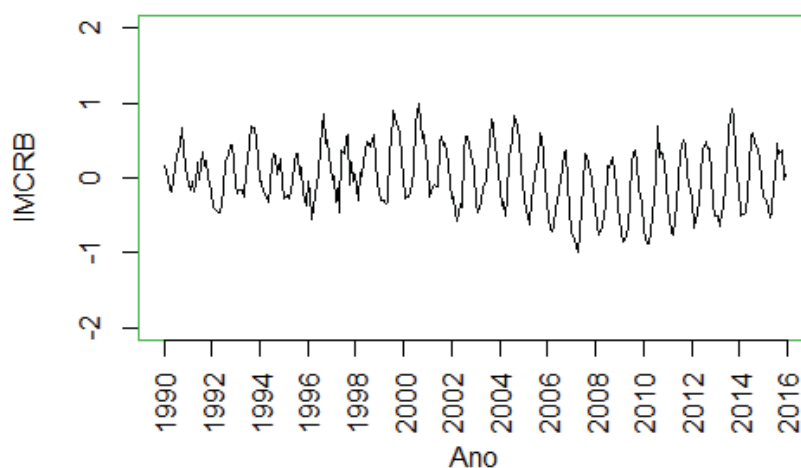
A porcentagem total de explicação dos fatores foi de 81,25%, sendo que os fatores com maior representatividade foram o primeiro, com 30,52%, e o segundo com 23,18%. Podemos observar que o primeiro fator apresentou uma mudança na média dos dados, diminuindo a média, aproximadamente no ano de 2007. O segundo fator também apresentou uma mudança da média dos dados, aumentando a média, aproximadamente no ano de 2000, ano em que houve um inverno muito rigoroso, com as menores temperaturas já registradas. Devido à alta porcentagem de representatividade dos dados, estes dois fatores terão maior influência no comportamento do índice.

Os sensores associados com o primeiro fator foram: dez extensômetros, dois piezômetros e uma base de alongâmetro, a qual mede o deslizamento do bloco. As comunalidades apresentadas neste fator mostraram que os sensores que possuem maior importância, no que diz respeito a movimentação da estrutura deste bloco, são os extensômetros  $X_8$ ,  $X_9$ ,  $X_7$ ,  $X_4$ ,  $X_3$ ,  $X_1$  e  $X_{10}$ , sendo que para estes sensores as comunalidades apresentadas superaram 0,92.

Os sensores relacionados com o segundo fator foram: três piezômetros, e cinco bases de alongâmetros, sendo que destas três medem abertura entre blocos, uma mede deslizamento e uma mede recalque. As comunalidades ficaram acima de 0,92 para três sensores de bases de alongâmetro, sendo estes  $X_{13}$ ,  $X_{11}$  e  $X_{15}$ , as quais medem abertura entre blocos, sendo estes considerados com maior importância para o segundo fator.

Utilizando os escores das cargas fatoriais, obtidos com a análise fatorial, como dados de entrada, gerou-se a série para o IMCRB dos dados do bloco I10, a qual é apresentada na Fig. 27.

Figura 27: Série para o IMCRB do bloco I10

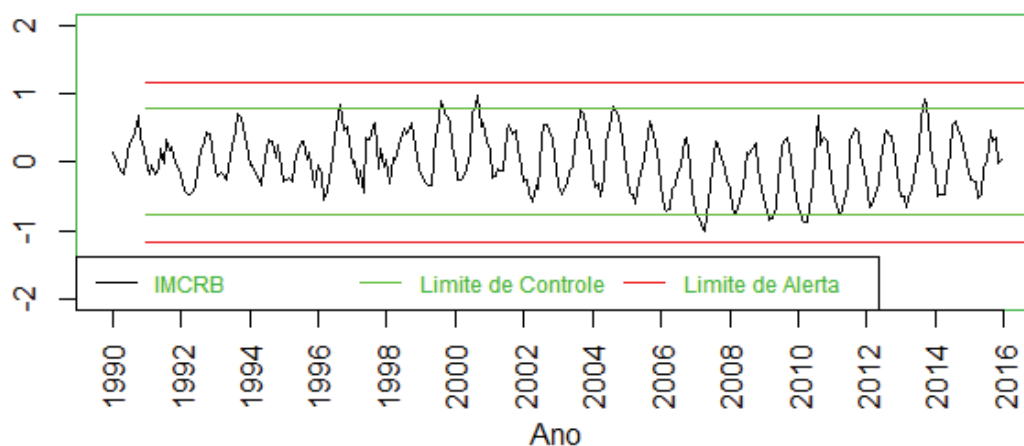


FONTE: Autoria própria (2018)

Esta série apresentou um comportamento bastante estável e não apresentou tendência, mostrando que a movimentação da estrutura e as subpressões da fundação deste bloco é bastante regular.

Com os valores da série temporal foram estipulados limites a 95% e 99% de confiança, e então gerou-se a carta de controle para o índice, apresentada na figura 28.

Figura 28: Carta de controle para o IMCRB do bloco I10

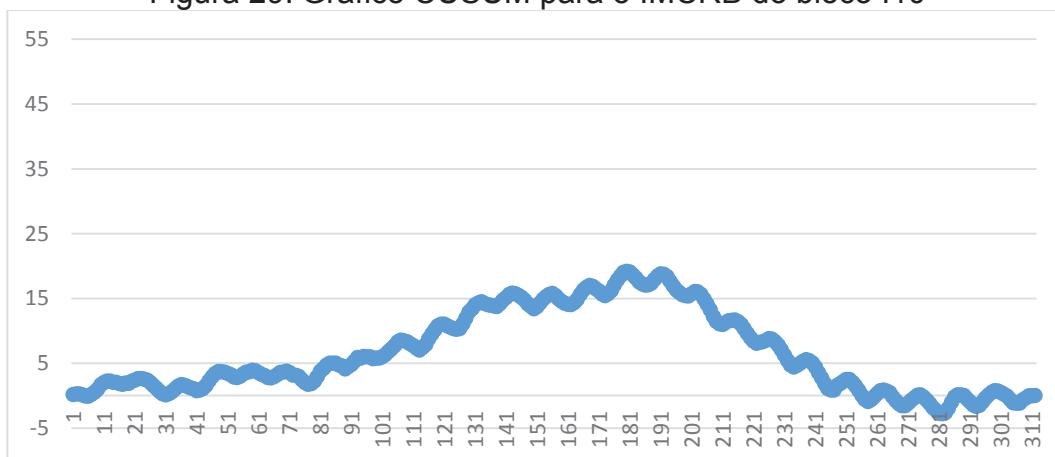


FONTE: Autoria própria (2018)

Percebe-se que os valores da série ficaram adequadamente distribuídos dentro dos limites de controle e alerta, não apresentando pontos atípicos ou fora dos limites de controle e alerta. Desta forma, podemos considerar que é estável e está sob controle.

A figura 29 apresenta o gráfico de controle da soma acumulada – CUSUM para o IMCRB do bloco I10, o qual mostra os desvios dos valores da amostra em relação à média do processo.

Figura 29: Gráfico CUSUM para o IMCRB do bloco I10



FONTE: Autoria própria (2018)

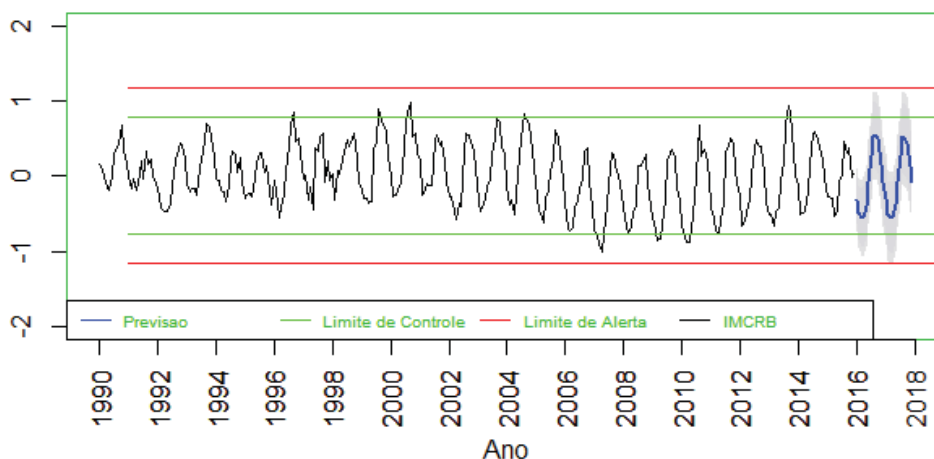
Por meio deste gráfico pode-se perceber uma mudança na média do processo entre 1997 e 2010, identificados pelos pontos 81 e 251, aproximadamente, a qual volta a ficar mais estável após esse período.



A amplitude observada é consideravelmente menor em relação ao gráfico CUSUM para o bloco F19/20, logo pode-se entender que os valores da série para o IMCRB do bloco I10 não apresentam grandes mudanças na média do processo.

A Fig. 30 a seguir mostra, destacado, a previsão de 24 valores futuros para a série.

Figura 30: Previsão para o IMCRB do bloco I10



FONTE: Autoria própria (2018)

A previsão dos dados futuros ficou determinada dentro dos limites e espera-se que a série dos dados da segunda etapa tenham o mesmo comportamento, o que de fato acontece.

#### 4.3 BLOCO I23 DO TRECHO I DA BARRAGEM DE ITAIPU

Para as análises do Bloco I23 foram coletados dados das medições de 23 sensores da instrumentação, no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2017. Os sensores referentes a este bloco foram renomeados como as variáveis  $W_1, W_2, \dots, W_{23}$ .

As medidas descritivas destas variáveis são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Medidas descritivas bloco I23

| Instrumento | Sensor | Média±Desvio<br>Padrão | Unidade de<br>medida |
|-------------|--------|------------------------|----------------------|
|-------------|--------|------------------------|----------------------|

|                     |          |                  |      |
|---------------------|----------|------------------|------|
| Base de alongâmetro | $W_1$    | $0,02 \pm 0,07$  | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_2$    | $0,07 \pm 0,01$  | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_3$    | $0,22 \pm 0,24$  | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_4$    | $0,52 \pm 0,07$  | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_5$    | $-0,06 \pm 0,01$ | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_6$    | $0,04 \pm 0,01$  | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_7$    | $-0,06 \pm 0,09$ | mm   |
| Base de alongâmetro | $W_8$    | $0,08 \pm 0,02$  | mm   |
| Pêndulo direto      | $W_9$    | $1,53 \pm 0,18$  | mm   |
| Pêndulo direto      | $W_{10}$ | $-0,12 \pm 0,35$ | mm   |
| Pêndulo direto      | $W_{11}$ | $6,20 \pm 0,34$  | mm   |
| Pêndulo direto      | $W_{12}$ | $0,38 \pm 0,94$  | mm   |
| Piezômetro          | $W_{13}$ | $159 \pm 0,48$   | msnm |
| Piezômetro          | $W_{14}$ | $155 \pm 0,16$   | msnm |
| Piezômetro          | $W_{15}$ | $158 \pm 0,31$   | msnm |
| Piezômetro          | $W_{16}$ | $155 \pm 0,48$   | msnm |
| Piezômetro          | $W_{17}$ | $168 \pm 2,19$   | msnm |
| Extensômetro        | $W_{18}$ | $0,062 \pm 0,02$ | mm   |
| Extensômetro        | $W_{19}$ | $0,07 \pm 0,03$  | mm   |
| Extensômetro        | $W_{20}$ | $0,02 \pm 0,03$  | mm   |
| Extensômetro        | $W_{21}$ | $0,01 \pm 0,03$  | mm   |
| Extensômetro        | $W_{22}$ | $-0,08 \pm 0,05$ | mm   |
| Extensômetro        | $W_{23}$ | $-0,11 \pm 0,05$ | mm   |

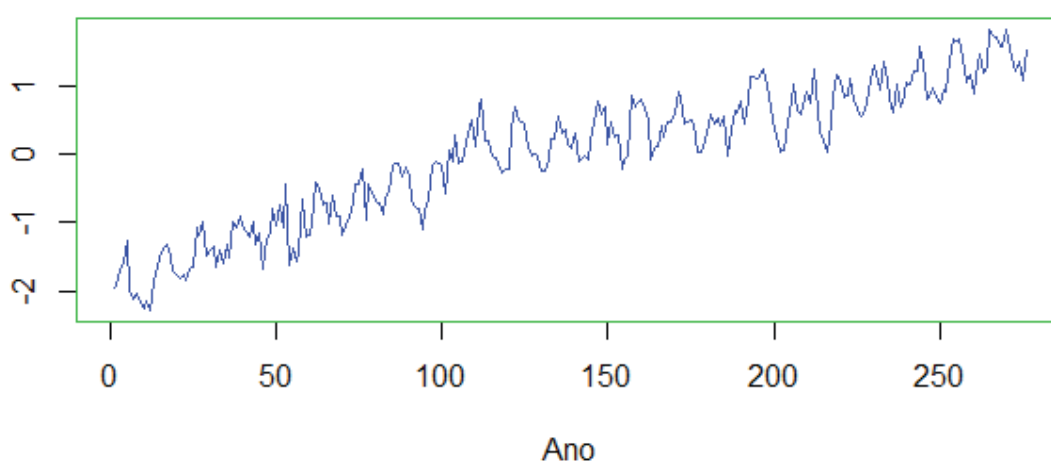
FONTE: Autoria própria

Após realizado o tratamento dos dados, a matriz de médias padronizada dos dados do bloco I23 foi enviada para o Software R para os testes quanto a adequabilidade da realização da análise fatorial.

O índice de adequabilidade para a análise fatorial foi  $KMO = 0,857164$ , mostrando-se adequado realizar a análise fatorial, por superar o mínimo estabelecido de 0,6.

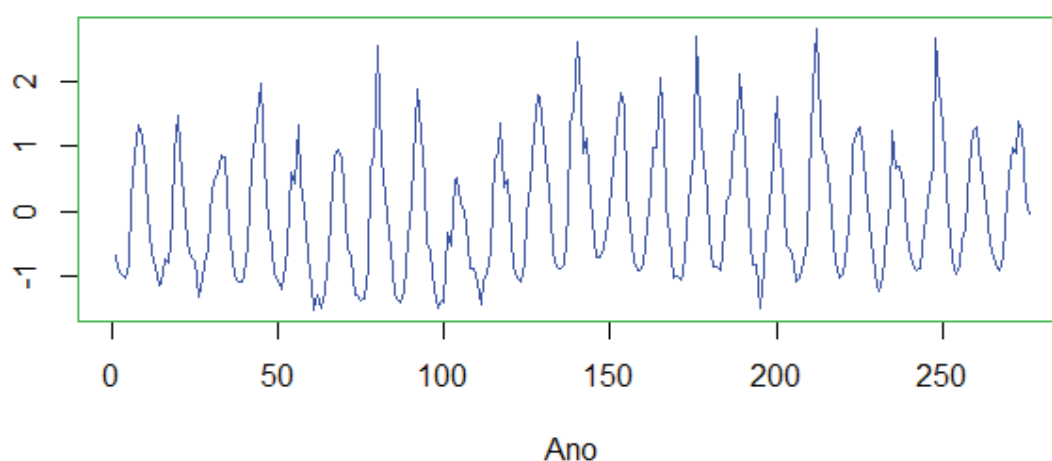
A análise fatorial foi realizada com 5 fatores, apresentados nas figuras 31 à 35 a seguir, e representou um total de 74,05% do total dos dados.

Figura 31: Série temporal do primeiro fator



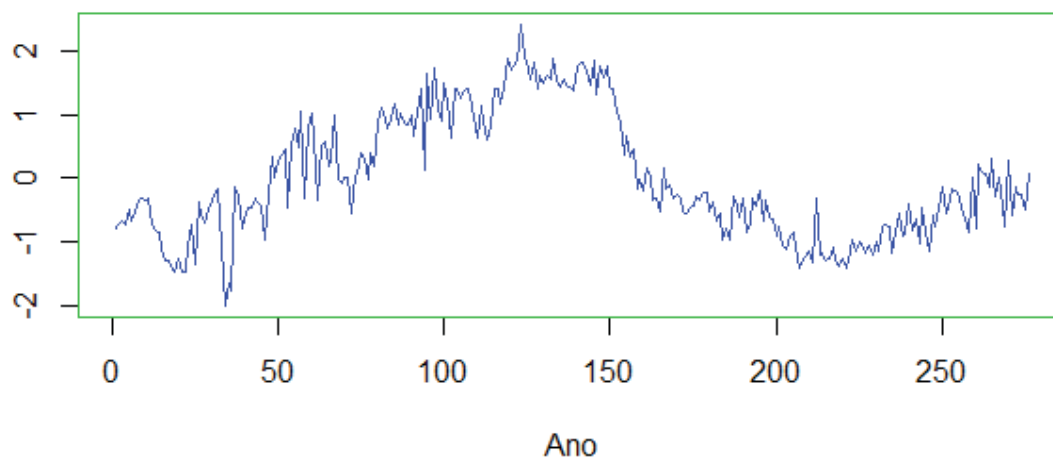
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 32: Série temporal do segundo fator



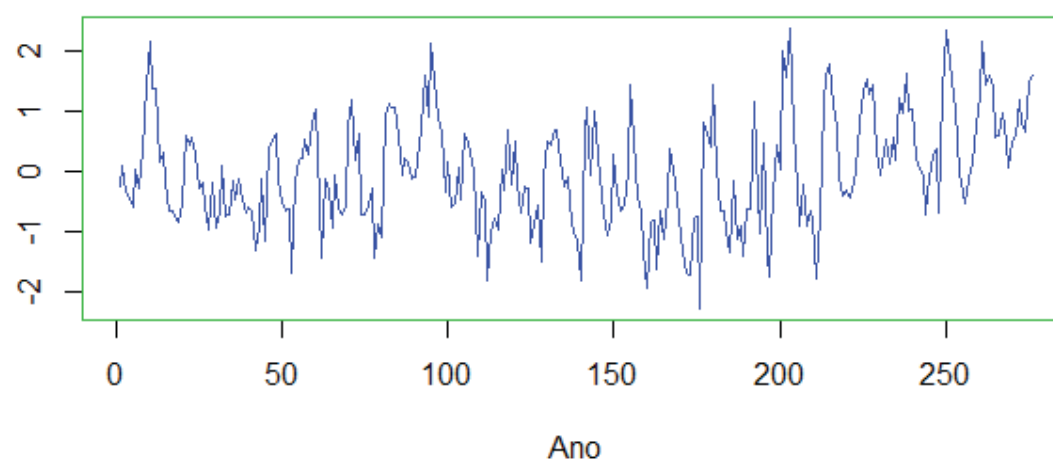
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 33: Série temporal do terceiro fator



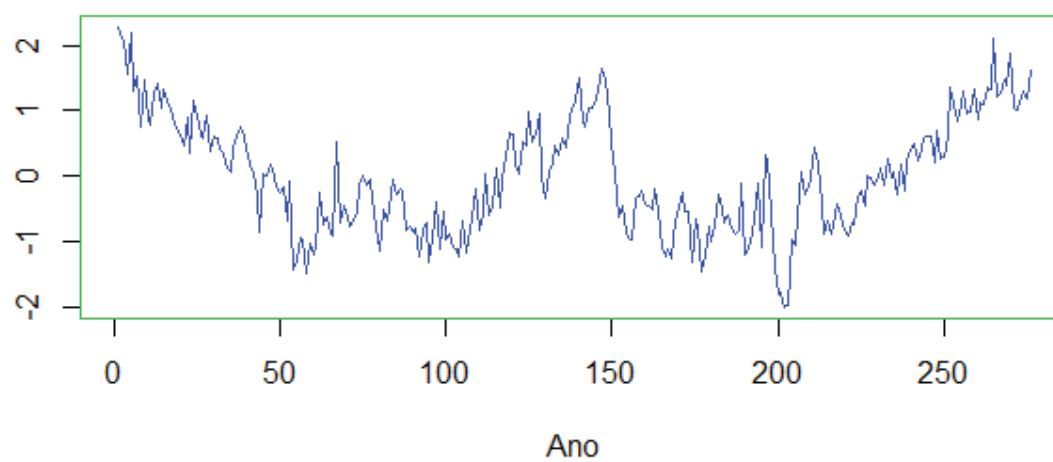
FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 34: Série temporal do quarto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

Figura 35: Série temporal do quinto fator



FONTE: Autoria própria (2018)

A porcentagem de explicação do primeiro fator foi de 25,98%, sendo que os sensores dos instrumentos que apresentaram maior correlação com esse fator foram três hastes de extensômetros, dois pêndulos diretos na direção X (montante-jusante), dois piezômetros e duas bases de alongâmetro, uma medindo o recalque e outra o deslizamento do bloco. As comunalidades indicam que os sensores que apresentaram maior importância, no que diz respeito a movimentação da estrutura deste bloco, são os extensômetros  $X_{22}$  e  $X_{23}$ , e a base de alongâmetro  $X_4$ , a qual mede o deslizamento do bloco.

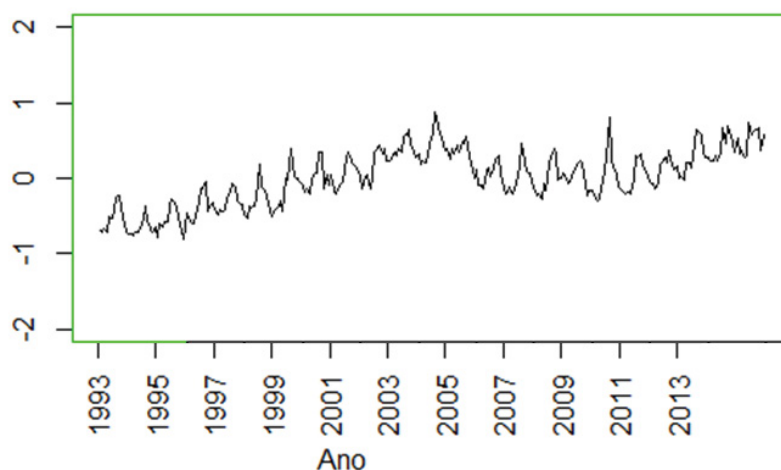
A porcentagem de explicação do segundo fator foi de 20,54%, sendo que os sensores que apresentaram maior correlação com esse fator foram: cinco bases de alongâmetro, dentre estas quatro medem abertura entre blocos e uma mede deslizamento, e dois sensores de pêndulos direto na direção Y (normal ao fluxo, na ombreira direita). As comunalidades indicaram que os sensores com maior importância neste fator foram  $X_7$  e  $X_3$ , relacionados à bases de alongômetros que medem abertura entre blocos.

Os fatores 1 e 2 tiveram maior representatividade para a geração do índice neste bloco, devido ao fato de que juntos representam grande parcela da explicação total dos dados.

O primeiro fator apresentou tendência sistemática de crescimento na média, observada com facilidade no gráfico da sua série. Esta tendência pode ter ocorrido devido à influência, principalmente dos extensômetros, que possuem forte correlação com este fator. É bastante provável que o índice apresente também esta tendência, devido ao fato deste fator ter maior representatividade da variação total dos dados, e também pelo motivo do segundo fator apresentar um comportamento bastante estável, sem tendência, mostrando apenas sazonalidade devido a temperatura.

Com os escores fatoriais gerou-se o IMCRB para o Bloco I23, o qual é apresentado em forma de gráfico na figura 36 a seguir.

Figura 36: Série para o IMCRB do bloco I23

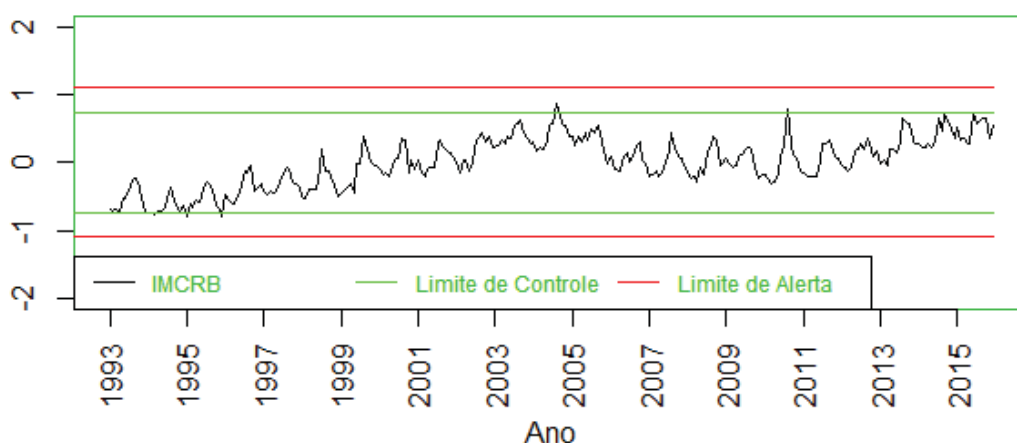


FONTE: Autoria própria (2018)

O comportamento do gráfico do índice para o bloco I23 apresenta pouca variabilidade nos dados. Porém essa série apresentou tendência sistemática crescente na média.

A carta de controle para esta série é apresentada na figura 37.

Figura 37: Carta de controle para o IMCRB do bloco I23



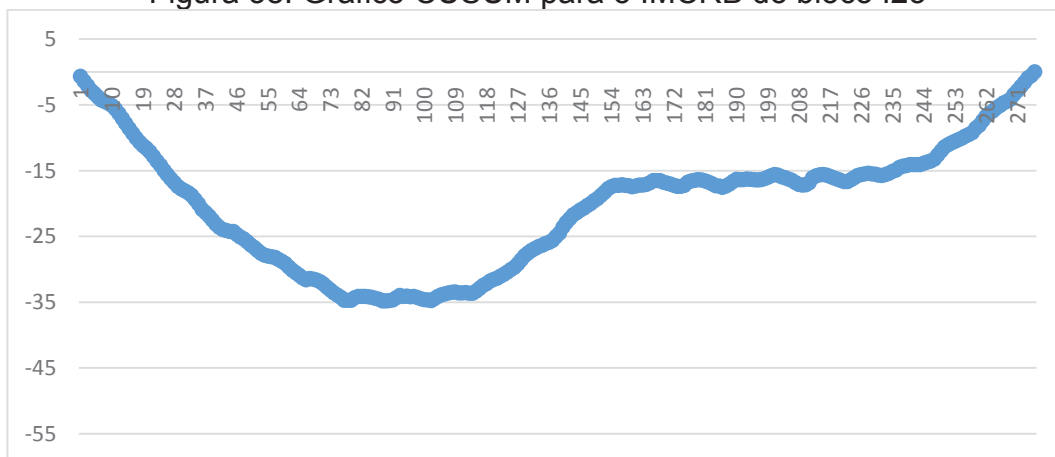
FONTE: Autoria própria (2018)

Observa-se que os dados da série para o IMCRB do bloco I23 ficaram dispostos, quase em sua totalidade, dentro dos limites de confiança estipulados.

A tendência dos dados pode ser resultado da influência dos extensômetros e bases de alongâmetro no primeiro e segundo fator, sendo esses os sensores que apresentaram maior importância para a variabilidade dos dados.

A figura 38 apresenta o gráfico de controle da soma acumulada – CUSUM para o IMCRB do bloco I23, o qual mostra os desvios dos valores da amostra em relação à média do processo.

Figura 38: Gráfico CUSUM para o IMCRB do bloco I23



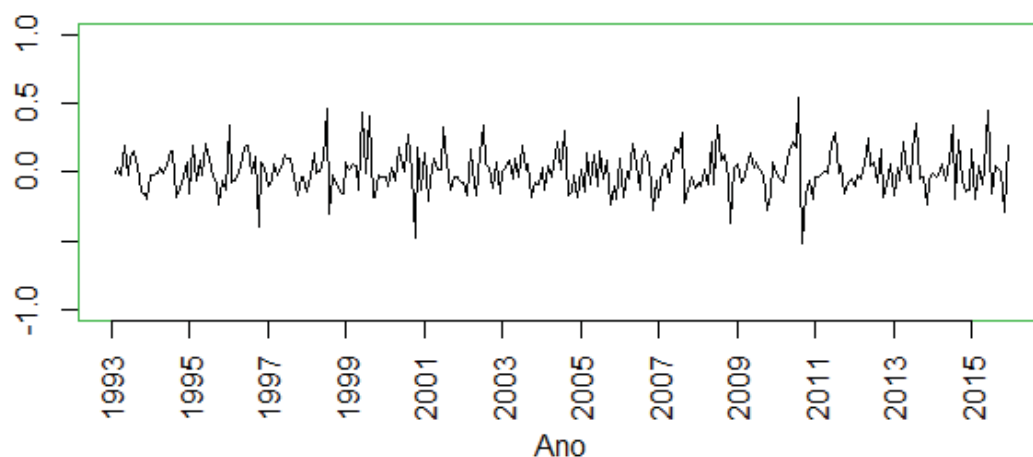
FONTE: Autoria própria (2018)

Por meio deste gráfico pode-se perceber os períodos onde houve uma mudança na variabilidade do processo, em relação à média. Uma mudança na média do processo pode ser observada por volta do ano de 1999, aproximadamente ponto 118, e após isso outra mudança acontece por volta do ano de 2010, aproximadamente ponto 245.

O gráfico CUSUM para esta série apresentou um formato voltado para baixo, diferente dos anteriores que ficaram voltados para cima. Observando o gráfico para a série do IMCRB, percebemos que este apresentou tendência crescente na média, iniciando a série com valores negativos. Esta ocorrência pode explicar o comportamento do gráfico CUSUM.

Para tornar a série estacionária, os fatores que geraram a série foram diferenciados, e assim obteve-se uma nova série para o IMCRB e consequentemente um novo gráfico, como mostra a figura 39.

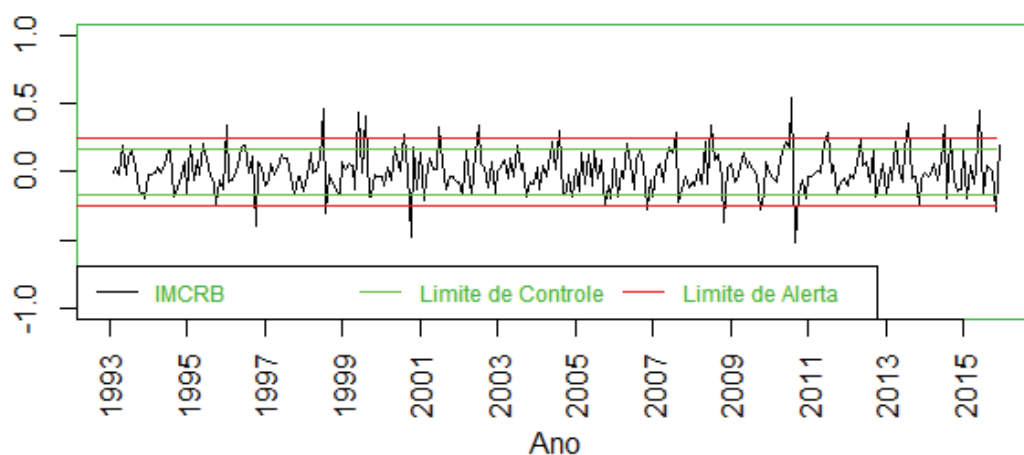
Figura 39: Série diferenciada para o IMCRB do bloco I23



FONTE: Autoria própria (2018)

Foram estipulados novos valores de limites de controle e alerta, os quais foram juntamente plotados com os valores da série diferenciada, gerando uma nova carta de controle, como mostra a Fig. 40.

Figura 40: Carta de controle para a série diferenciada do IMCRB do bloco I23



FONTE: Autoria própria (2018)

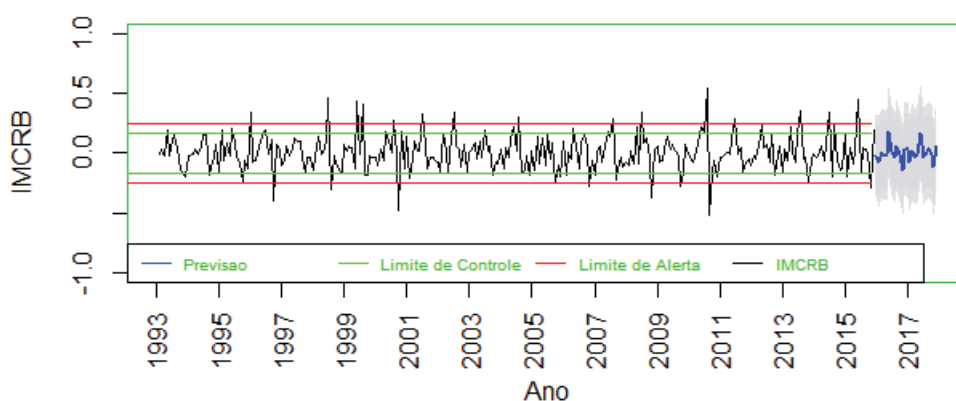
Por meio das cartas de controle pode-se identificar alguns pontos fora dos limites de controle e alerta estipulados para a carta de controle. Essa ocorrência pode ser consequência da mudança na média do processo no decorrer do período de estudo.



Nesse caso poderia ser desenvolvido um estudo minucioso com os instrumentos mais correlacionados com o primeiro fator, visto que é o fator que possui maior potencial de explicação e influência no comportamento do índice.

A carta de controle da figura 41, apresenta as previsões para a série nos próximos 24 meses.

Figura 41: Previsão para a série diferenciada do IMCRB do bloco I23



FONTE: Autoria própria (2018)

As previsões indicam que nos próximos períodos os valores do índice permanecerão dentro dos limites de confiança. Isso de fato acontece quando comparamos os valores reais para os anos de 2016 e 2017, o que valida os resultados encontrados.

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou análises estatísticas aplicadas a um conjunto de dados das medições dos sensores da instrumentação de três blocos da Barragem de Itaipu, sendo estes bloco F19/20, do Trecho F, e blocos I10 e I23, do Trecho I. Por meio de técnicas estatísticas e do índice IMCRB, foi possível identificar padrões de comportamento relacionados a movimentação da estrutura de cada bloco, durante o período estudado.

A análise fatorial permitiu identificar o conjunto de sensores da instrumentação que possuem maior influência em relação a movimentação e subpressões dos blocos e fundação da barragem. E ainda, identificar os sensores de maior importância dentro de cada fator.

Por meio do índice IMCRB foi possível gerar séries que representaram o comportamento conjunto da instrumentação de cada bloco, permitindo analisar de forma conjunta os dados como o comportamento da estrutura e fundações, e a existência de tendência sistemática na série de dados.

As cartas de controle permitiram identificar valores fora dos limites de confiança estipulados nas cartas de controle, para assim averiguar se o processo referente a cada bloco estudado é estável, de acordo com a disposição dos dados em cada carta.

O método utilizado foi desenvolvido para ser aplicado nas barragens de contrafortes, porém ao ser aplicado numa barragem de gravidade aliviada mostrou-se aplicável e viável. Portanto, com a utilização de técnicas estatísticas e o IMCRB foi possível colaborar para a avaliação da segurança de três blocos da Barragem de Itaipu, auxiliando no monitoramento dos dados apresentados pelas medições dos sensores da instrumentação instalada nos blocos estudados.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de variáveis externas ao conjunto de variáveis utilizado, como a defasagem no tempo, a temperatura ambiente, o nível de água do reservatório. Isso poderá agregar informações que permitirão encontrar resultados cada vez mais próximos da realidade.

## REFERÊNCIAS

BOX, G. E. P. & JENKINS, G. M – **Time Series Analysis, forecasting and control**, ed. Holden Day, 1976.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Presidência da República, Casa civil, Subchefia para assuntos jurídicos. Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: < <http://www.defesacivil.pr.gov.br/arquivos/File/Barragens/L12334.pdf> >. Acesso em: 15 de out. 2018.

CHAGAS, E. S.; RUSSO, S. L; SIMON, V. H. **Gráficos de Controle CUSUM: Uma forma eficaz para detectar pequenos desajustes na média de um processo**. 2012.

CHAVES NETO, A. **Análise de Séries Temporais: Notas de aula**. Foz do Iguaçu. 2014.

\_\_\_\_\_. **Análise Multivariada Aplicada à Pesquisa: Notas de aula**. Foz do Iguaçu. 2014.

CHAVES NETO, A.; CHAVES, I. A. **Técnicas Estatísticas Aplicadas à Engenharia da Qualidade: Notas de aula**. Foz do Iguaçu. 2014.

DORNELLES, E. S.; ORO, S. R.; MAFIOLETI, T. R. **Methodology for the Modeling of the Joint Monitoring Index Blocks Response of a Concrete Dam**. In: Third Internacional Dam World Conference, 3, Foz do Iguaçu, p. 1-9. 2018.

Gil, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social** / Antonio Carlos Gil. - 6. ed. - São Paulo : Atlas, 2008.

HAIR Jr.,J.F; **Multivariate Data Analysis**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu Binacional: A Maior Geradora de Energia Limpa e Renovável do Planeta**. Disponível Em: < <https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso Em: 22 Set. 2018.

\_\_\_\_\_. **Itaipu Binacional: Instrumentação**. Disponível Em: < <https://www.itaipu.gov.br/energia/instrumentacao>>. Acesso Em: 22 Set. 2018.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de Dados Multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

LOPES, K. S. **Introdução ao uso do Software R**. UFBA. Disponível em: <[https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/106363\\_3cdd7d2bedb74c32a5ae86b4bdefb435.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/106363_3cdd7d2bedb74c32a5ae86b4bdefb435.html)>. Acesso em: 12 de set. 2018.

MACHADO, W. G. de F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração** / W. G. F. Machado. – São Paulo, 2007. 155 p.

MINGOTI, A. Sueli – **Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada**, Editora UFMG, B. Horizonte, 2007.

MSIB. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.

MATWORKS. **MATLAB**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 02 de out. 2018.

ORO, S. R. **Índice de Monitoramento do Comportamento Estrutural dos Blocos de Concreto de Barragens – Uma Abordagem Multivariada** / Sheila Regina Oro. – Curitiba, 2016. 139 f.

PIASENTIN, C. Curso Segurança de Barragens. Barragens: Aspectos legais, técnicos e socioambientais. **Unidade 1: Diretrizes, legislação e regulamentação**. 2013. Disponível em: <[http://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/110/2/Unidade\\_1-modulo1.pdf](http://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/110/2/Unidade_1-modulo1.pdf)>. Acesso em: 12 de ago. 2018.

POSSAN, E. Curso Segurança de Barragens. Barragens: Aspectos legais, técnicos e socioambientais. **Unidade 10: Barragens de concreto**. 2013. Disponível em: <[https://capacitacao.ead.unesp.br/conhecerh/bitstream/ana/110/4/Unidade\\_10-modulo1.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/conhecerh/bitstream/ana/110/4/Unidade_10-modulo1.pdf)>. Acesso em: 10 de set. 2018.

**R Core Team** (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**, ENGEVIX S.A., ed. Edgard Blücher Ltda., Brasil, 1977.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. Ed. Brasília: ANEEL/ANA, 2000. 207 p.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto** / João Francisco Alves Silveira. – São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

VIEIRA JUNIOR, L. P. SALLES, M. F. **A tecnologia do concreto aplicada ao projeto de barragens. Melhores práticas tecnologia do concreto**. Concreto & construções. Ano XXXIX nº 63, 2011, 15-23p.

ZUCULIN, S. **Curso Segurança de Barragens: Módulo II: Inspeção e Auscultação de Barragens: Unidade 2: Instrumentação de Barragens**. 2013. 71 p.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens** / Monica Soares Resio Zuffo.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

## Anexo 1 – Script para a geração da matriz de médias mensais

```
[linha,coluna]=size(dados);
matriz(1:linha,1:4)=zeros;
matriz(1:linha,2:4)=dados;
j=1;
k=1;
ano_ini=matriz(1,3);
for i=k:linha
    if matriz(k,3)==ano_ini
        matriz(k,1)=j;
        k=k+1;
        while matriz(k,3)==ano_ini
            matriz(k,1)=j;
            k=k+1;
        end

        while matriz(k,3)>ano_ini
            matriz(k,1)=j;
            k=k+1;
        end
    end
    j=j+1;
end

matriz_media=zeros(((matriz(linha,3)-matriz(1,3))+1)*12,(matriz(linha,
1)+2));
instrumento=1;
ano=matriz(1,3);
mes=1;
for i=1:((matriz(linha,3)-matriz(1,3))+1)*12
    if rem(i,12)~=0 matriz_media(i,1)=ano;
        matriz_media(i,2)=mes;
        mes=mes+1;
    else matriz_media(i,1)=ano;
        matriz_media(i,2)=mes;
        mes=1;
        ano=ano+1;
    end
end

mes=1;
n=0;
j=1;
soma=0;
instrumento=1;
diferenca=0;
for i=1:linha
    if matriz(i,2)==mes
        soma=soma+matriz(i,4);
        n=n+1;
    else matriz_media(j,instrumento+2)=soma/n;
        soma=0;

```

```

n=0;
diferenca=matriz(i,2)-mes;
if diferenca>1
    for k=1:(diferenca-1)
        j=j+1;
        matriz_media(j,instrumento+2)=999999;
        mes=mes+1;
    end
    diferenca=0;
end
soma=matriz(i,4);
n=1;
if mes<12
    mes=mes+1;
else mes=1;
end
if matriz (i,1)~=instrumento
    instrumento=instrumento+1;
    j=1;
else j=j+1;
end
end
end

```

## Anexo 2 – Script para as análises no Software R

```
# Para padronização dos dados
dados<- scale(matriz_medias_dos_sensores)

# Matriz de covariâncias e correlação
S <- cov(dados);          # matriz de covariancias
print(S, digits = 3)
R <- cor(dados);          # matriz de correlacoes
print(R, digits = 3)

# Teste de esfericidade de Bartlett
n <- nrow(dados);          # total de observacoes
p <- ncol(dados);          # total de variaveis
auto <- eigen(R);          # autovalores e autovetores da matriz de correlacoes
a <- log(auto$values);      # $values sao os autovalores, $vectors sao os autovetores
UM <- cbind(rep(1,p));
lambda = a%%UM;
Tcalc = -(n-(1/6)*(2*p+11))*(lambda);
Tcalc          #Mostra o valor da estatística T
gl=(1/2)*p*(p-1);
T_95 <- qchisq(0.95,gl);
T_95

# Medidas de adequacao amostral KMO
partial.cor <- function (X, ...)          # correlacoes parciais
{
  R <- cor(X, ...)
  RI <- solve(R)
  D <- 1/sqrt(diag(RI))
  Rp <- -RI * (D %o% D)
  diag(Rp) <- 0
  rownames(Rp) <- colnames(Rp) <- colnames(X)
  Rp
}
matcorp <- partial.cor(dados);          # matriz das correlacoes parciais
idiag <- seq(1, by = p + 1, length = p);
somar2 <- sum((as.numeric(R)[-idiag])^2);
cat("\n KMO = ",somar2 / (somar2 + sum((as.numeric(matcorp)[-idiag])^2)))

## Analise Paralela de Horn - APH ##
Rep <- 1000;
Cent <- 0.95;
library(nFactors);
ap <- parallel(subject=n,var=p,rep=Rep,cent=Cent);
apAutovet <- ap$eigen;
results <- nScree(eig = auto$values,aparallel=apAutovet$gevpea);results
plotnScree(results,legend = TRUE,ylab = "Autovalores",xlab = "Componentes",
  main = "Analise Paralela de Horn")
```

```
#Análise fatorial
k <- 6    #inserir número de fatores
af<-fa(dados, nfactors=k, rotate = "varimax")
print(af, digits=4, cutoff=.3, sort=TRUE)      # Imprime os resultados
escores<-af$scores
plot.ts(escores, col = 'blue', xlab="Ano", main="Series Temporais dos Fatores")
```